

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Měření Triple play služeb v heterostrukturní síti

Measurement of Triple Play Services in Hetero-structural Network

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Josef Filip

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Měření Triple play služeb v heterostrukturní síti
Measurement of Triple Play Services in Hetero-structural Network

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

V rámci této práce má student za úkol provést měření Triple play služeb v heterostrukturní síti tvořené xWDM a xDSL technologiemi (ZyXEL IES-1000 či ZyXEL IES-5005). Na vybudované trase bude student poté měřit typické optické parametry. Během měření budou měněny délky optické trasy stejně, jako metalické pomocí dodatečného vkládání optické trasy respektive v případě metalické části skrze simulátor vedení (Spirent DLS-6900). Na vybudované heterostrukturní síti bude napojen VLC/IP-DVB streamer, který bude zdrojem pro šíření video-toků. Dále VoIP ústředna pro testování hlasových toků a poslední službou bude datová konektivita. Celkově pak všechny služby budou zákaznický orientovanými službami skrze Triple play. Student poté bude provádět analýzu kvality všech služeb skrze měřicí přístroje. Student bude mít za úkol na dané heterostrukturní síti měřit parametry podle ITU-T 1564.Y, RFC 2544 a další.

1. Popis přístupových a hybridních xPON sítí.
2. Popis technologie xDSL.
3. Vytvoření experimentálního pracoviště pro heterostrukturní síť xWDM/xDSL s testováním zákaznických služeb.
4. Vyhodnotíte výsledky získané z měření.

Seznam doporučené odborné literatury:

[1] KAZOVSKY, Leonid G., et al.; Broadband Optical Access Networks. Canada: Wiley, 2011. 283 p. ISBN 978-0-470-18235-2.

[2] MA, Maode. Current Research Progress of Optical Networks. 1st Edition. [s.l.]: Springer, 2009. 282 p. ISBN 978-1402098888

[3] LAM, Cedric. Passive Optical Networks: Principles and practice. Oxford: Elsevier Onc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0

[4] DHAINI, Ahmad R. Next-Generation Passive Optical Networks. Saarbrücken: VDM Verlag, 2008. 132 p. ISBN 978-3836435062

[5] GORALSKI, Walter. ADSL and DSL technologies. New York: McGraw-Hill, c1998, xxxii, 379 p. ISBN 00-702-4679-3.


[6] HENS, Francisco J a Jose Manuel CABALLERO. Triple play: building the converged network for IP, VoIP and IPTV. Hoboken, NJ: Wiley, c2008, 401 s. ISBN ISBN 978-0-470-75367-5.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Látal, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 28. dubna 2017

.....*Filip*.....

Filiu

Rád bych poděkoval Ing. Janu Látalovi, Ph.D. za odbornou pomoc při vytváření diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat za spolupráci a odbornou pomoc při praktické části diplomové práce Ing. Zdeňkovi Wilčekovi.

Abstrakt

Diplomová práce s názvem Měření Triple play služeb v heterostrukturní síti se zabývá problematikou hybridních sítí xPON/xDSL. Zvláště výkonnostním testováním a nasazením Triple Play služeb na vytvořenou topologii. Diplomová práce je rozčleněna na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou nejprve rozebrány pasivní optické přístupové sítě. Další část popisuje technologie xDSL. Závěr teoretické části se zaměřuje na služby Triple Play. V praktické části je popsána infrastruktura sítě a následné testování její integrity na základě RFC 2544 a ITU-T Y.1564. Součástí praktické části je i nasazení Triple Play služeb a následné objektivní hodnocení. Závěrečná část se zabývá vytvořením reálné topologie optické sítě v aplikaci Optiwave OptiSystem.

Klíčová slova: xPON, ADSL2+, VDSL2, Triple Play, RFC 2544, ITU-T Y.1564 EtherSAM, PSNR, SSIM, MSE, Optiwave OptiSystem

Abstract

Diploma thesis Measurement of Triple Play Services in Hetero-structural Network deals with the problematics of hybrid xPON/xDSL networks. Especially with performance testing and deployment of Triple Play services on the created topology. The thesis is divided into the theoretical and practical part. In the theoretical part is first analyzed passive optical access networks. Next part is focused on xDSL technology. Conclusion of theoretical part is focused on Triple Play services. The practical part describes the network infrastructure and then testing integrity of the network by RFC 2544 and ITU-T Y.1564 testing standards. Part of the optical part is also deployment of Triple Play services and their objective evaluation. Last part of the thesis deal with creating real optical network in Optiwave OptiSystem.

Key Words: xPON, ADSL2+, VDSL2, Triple Play, RFC 2544, ITU-T Y.1564 EtherSAM, PSNR, SSIM, MSE, Optiwave OptiSystem

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	10
Seznam obrázků	13
Seznam tabulek	17
1 Úvod	18
2 Optická přístupová síť	19
2.1 Funkční bloky Optické přístupové sítě	20
2.2 FTTX	20
2.3 Topologie sítě	21
3 PON sítě	24
3.1 APON	24
3.2 BPON	24
3.3 GPON/XG-PON	24
3.4 EPON/10GEPON	25
4 Technologie NG-PON	27
4.1 WDM-PON	28
4.2 Opportunistic and dynamic spectrum management PON (ODSM-PON)	33
4.3 Stacked XG-PON	34
4.4 WDM-TDM PON (Hybrid PON)	35
4.5 xPON/xDSL	36
5 Přehled technologií xDSL	37
5.1 Basic Rate ISDN (BRI)	37
5.2 HDSL	38
5.3 ADSL	38
5.4 VDSL	41
6 Triple Play služby	42
6.1 Kvalita služby QoS (Quality of Service)	42
6.2 IPTV	43
6.3 VoIP	50

7	Infrastruktura sítě	55
7.1	Síťové komponenty	55
7.2	Používané měřicí přístroje a programy	59
7.3	Měření útlumu optické trasy	62
7.4	Měření chromatické disperze (CD)	62
7.5	Měření Polarizačně vidové disperze (PMD)	63
7.6	Spektrální analýza optické sítě	64
7.7	ADSL2+ a VDSL2 přenosové rychlosti	65
8	Ověření integrity sítě	69
8.1	RFC 2544	69
8.2	EtherSAM (ITU-T Y.156sam)	76
9	Měření kvality nasazené Triple play služby	86
9.1	IPTV	86
9.2	VoIP	99
9.3	Data	100
10	Simulace optické sítě v softwaru Optiwave Optisystem	102
10.1	L3 switch ZyXEL XGS-4528F, L2 switch ZyXEL GS-1524	102
10.2	ODN	103
10.3	Výsledky simulace	104
11	Závěr	108
	Literatura	110
	Přílohy	112
A	Obsah DVD	113
B	Grafy	114
C	Tabulky	119
D	Konfigurace služeb Triple Play na serveru Abacus	124
E	Ukázky práce s používanými programy	129
F	Výsledky simulace	134

Seznam použitých zkratk a symbolů

10GEAPON	– 10 Gigabit EPON
ACELP	– Algebraic-Code Excited Linera Prediction
ACR	– Absolute Category Rating
ADPCM	– Adaptive Differential Pulse Code Modulation
ADSL	– Asymmetric Digital Subscriber Line
AON	– Active Optical Network
APON	– ATM-PON
ATU-C	– ADSL Transceiver Unit - Central office
ATU-R	– ADSL Transceiver unit - Remote terminal
AWG	– Arrayed Waveguide Grating
BER	– Bit Error Rate
BPON	– Broadband PON
BRI	– Basic Rate Interface
CAP	– CARRIERless Amplitude Phase
CD	– Chromatic Dispersion
CELP	– Code-Excited Linear Predictive
CIR	– Committed Information Rate
CPVR	– Client Personal Video Recording
CS-CELP	– Conjugate Structure Code-Excited Linear Predictive
CWDM	– Coarse Wavelength Division Multiplex
DHCP	– Dynamic Host Configuration Protocol
DMT	– Discrete Multi Tone
DPCM	– Differential Pulse Code Modulation
DSCQS	– Double Stimulus Continuous Quality Scale
DSL	– Digital Subscriber Line
DSLAM	– Digital Subscriber Line Access Multiplexer
DWDM	– Dense Wavelength Division Multiplex
DWMT	– Discrete wavelet Multi-Tone transmission
EC	– Echo Cancelation
EIR	– Excess Information Rate
EPG	– Electronic Programming Guide
EPON	– Ethernet PON
ETSI	– European Telecommunications Standards Institute
FDD	– Frequency Division Duplex
FDM	– Frequency Division Multiplexing
FSAN	– Full Service Access Network

FTTB	– Fiber To The Building
FTTC	– Fiber To The Curb
FTTCab	– Fiber To The Cab
FTTH	– Fiber To The Home
FTTN	– Fiber To The Node
FTTO	– Fiber To The Office
FTTx	– Fiber To The x
GPON	– Gigabit PON
HDSL	– High-bit-rate Digital Subscriber Line
HTTP	– HyperText Transfer Protocol
IDSL	– Intgerated Digital Subscriber Line
IEE	– Institution of Electrical and Electronics Engineers
IETF	– Internet Engineering Task Force
IGMP	– Internet Groupt Membership Protocol
IP	– Internet Protocol
IPPM	– The Internet Protocol Performance Metrics
IPTV	– Internet Protocol Television
ISDL	– ISDN DIgital Subscriber Line
ISDN	– Integrated Services Digital Network
KPIs	– Key Performance Indicators
MOS	– Mean Opinion Score
MOS-LQS	– Mean Opinion Score - Listening Quality Subjective
MPC-MLG	– Multi-Pulse Maximum Likelihood Quantization
MPEG	– Moving Pictures Expert Group
MPLS	– Multiprotocol Label Switching
MSE	– Mean Square Error
NG-PON	– Next generation Passive Optical Network
NPVR	– Network Personal Video Recording
ODN	– Optical Distribution Network
ODSM-PON	– Opportunistic and Dynamic Spectrum Management Passive Optical Network
OLT	– Optical Line Terminal
ONT	– Optical Network Terminal
ONU	– Optical Network Unit
OSA	– Optical Spectrum Analyzer
OTDR	– Optical Time Domain Reflectometer
PCM	– Pulse Code Modulation
PESQ	– Percequtal Estimation of Speech Quality
PMD	– Polarization MObde Dispersion

PON	– Passive Optical Network
PSNR	– Peak Signal-to-Noise Ratio
PSQM	– Perceptual Speech Quality Measuer
PVR	– Personal Video Recording
QoS	– Quality of Service
RTCP	– Real-time Control protocol
RTP	– Real-time Transport Protocol
SDSL	– Symmetrical Digital Subscriber Line
SFP	– Small-Form-Pluggable
SHDSL	– Single-pair High-bit-rate Digital Subscriber Line
SMPTE	– Society of Motion Picture and Television Engineers
SSIM	– Structural similarity index
STB	– Set-Top-Box
TC-PAM	– Trellis Coded-Puls Amplitude Modulation
TCP	– Transmission Control Protocol
TDM	– Time Division Multiplexing
TDMA	– Time Divisiono Multiplexing Access
TIA	– Telecommunications Industry Association
UDP	– User Datagram Protocol
UDWDM	– Ultra Dense Wavelength Division Multiplex
VDSL	– Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line
VoD	– Video on Demand
VoIP	– Voice over IP
WDM	– Wave Division Multiplex
WDM-PON	– Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network
WWDM	– Wide Wavelength Division Multiplex
XG-PON	– X Gigabit PON

Seznam obrázků

1	Základní rozdělení optických přístupových sítí	19
2	Topologie sítě	21
3	Evoluce NG-PON technologie dle FSAN	27
4	Kanály CWDM definované dle ITU-T G.694.2 [7].	29
5	WDM-PON s pasivním rozbočovačem	31
6	WDM-PON s využitím AWG směrové odbočnice	32
7	Kaskádní zapojení AWG odbočnic a pasivních rozbočovačů	32
8	Princip de/multiplexace vlnových délek pomocí metody AWG	33
9	Technologie ODSM	34
10	Stacked XG-PON	35
11	WDM-TDM PON	35
12	Hybridní síť xPON/xDSL	36
13	Referenční model ADSL	39
14	FDM dělení přenosového kanálu	40
15	EC dělení přenosového kanálu	40
16	Používané protokoly pro audiovizuální služby v konvergovaných sítích	46
17	Vztah mezi R-faktorem a stupnicí MOS	53
18	Blokové schéma propojení laboratoří	55
19	Reflektogram pro optickou trasu 9,82 km	63
20	Topologie pro měření optického spektra	64
21	Optické spektrum při optické trase 9,82 km, downstream	65
22	Optické spektrum při optické trase 9,82 km, upstream	65
23	Závislost přenosové rychlosti na délce metalického vedení u vybraného profilu ADSL2+	67
24	Rozprostření bitů mezi tóny pro 0 km a 3 km	67
25	Topologie při ověřování integrity sítě podle standardu RFC 2544	70
26	Propustnost pro sestupný směr u ADSL2+	70
27	Propustnost pro vzestupný směr u ADSL2+	71
28	Zatížitelnost pro sestupný směr u ADSL2+	71
29	Zatížitelnost pro vzestupný směr u ADSL2+	72
30	Ztrátovost pro sestupný směr u ADSL2+	72
31	Ztrátovost pro vzestupný směr u ADSL2+	72
32	Zpoždění u ADSL2+	73
33	Propustnost pro sestupný směr u VDSL2	74
34	Propustnost pro vzestupný směr u VDSL2	74
35	Zatížitelnost pro sestupný směr u VDSL2	74
36	Zatížitelnost pro vzestupný směr u VDSL2	75

37	Ztrátovost pro sestupný směr u VDSL2	75
38	Ztrátovost pro vzestupný směr u VDSL2	75
39	Zpoždění u VDSL2	76
40	Třídy provozu	77
41	Topologie při ověřování integrity sítě podle standardu EtheSAM (ITU-T Y.156sam)	78
42	Průměrná propustnost, ADSL2+	79
43	Průměrný jitter, ADSL2+	79
44	Ztrátovost paketů, ADSL2+	80
45	Zpoždění, ADSL2+	80
46	Průměrná propustnost u profilu 1, VDSL2	81
47	Průměrná propustnost u profilu 2, VDSL2	82
48	Průměrná propustnost u profilu 1, VDSL2	82
49	Průměrná propustnost u profilu 2, VDSL2	83
50	Ztrátovost u profilu 1, VDSL2	83
51	Ztrátovost u profilu 2, VDSL2	84
52	Zpoždění u profilu 1, VDSL2	84
53	Zpoždění u profilu 2, VDSL2	85
54	Topologie sítě	86
55	Přenosová rychlost videa MPEG-2 1080p při optické trase 0 km a 0 km metalické trasy u VDSL2	88
56	Přenosová rychlost videa MPEG-2 1080p při optické trase 0 km a 0,7 km metalické trasy u VDSL2	89
57	Snímek vzorku videa DVB-T při optické trase 0 km a metalické trase 0 km, ADSL2+	90
58	Snímek vzorku videa DVB-T při optické trase 0 km a metalické trase 3 km, ADSL2+	90
59	Konkrétní snímek vzorku videa DVB-T při optické trase 0 km a metalické trase 0 km, VDSL2+	92
60	Konkrétní snímek vzorku videa DVB-T při optické trase 0 km a metalické trase 0,7 km, VDSL2+	92
61	Hodnoty parametru MSE u multicastového provozu, ADSL2+	93
62	Hodnoty parametru PSNR u multicastového provozu, ADSL2+	93
63	Hodnoty parametru SSIM u multicastového provozu, ADSL2+	93
64	Hodnoty parametru MSE u unicastového provozu, ADSL2+	94
65	Hodnoty parametru PSNR u unicastového provozu, ADSL2+	94
66	Hodnoty parametru SSIM u unicastového provozu, ADSL2+	95
67	Hodnoty parametru MSE při délce optické trasy 0 km a metalické trasy 0 km	95
68	Hodnoty parametru PSNR při délce optické trasy 0 km a metalické trasy 0 km	96
69	Hodnoty parametru SSIM při délce optické trasy 0 km a metalické trasy 0 km	96

70	Hodnoty parametru MSE u multicastového provozu, VDSL2	96
71	Hodnoty parametru PSNR u multicastového provozu, VDSL2	97
72	Hodnoty parametru SSIM u multicastového provozu, VDSL2	97
73	Hodnoty parametru MSE u multicastového provozu, VDSL2 - MPEG-2 1080p . .	98
74	Hodnoty parametru PSNR u multicastového provozu, VDSL2 - MPEG-2 1080p .	98
75	Hodnoty parametru SSIM u multicastového provozu, VDSL2 - MPEG-2 1080p .	98
76	Schéma zapojení při měření hlasových služeb	99
77	Topologie optické sítě	102
78	Vysílací a přijímací část SFP 1550 nm	103
79	Hodnoty BER v logaritmicím vyjádření v závislosti na délce optické trasy . .	104
80	Diagram oka pro první kanál při trase 5 a 35 km, sestupný směr	105
81	Diagram oka pro první kanál při trase 5 a 35 km, vzestupný směr	105
82	Diagram oka pro druhý kanál při trase 5 a 35 km, sestupný směr	105
83	Diagram oka pro druhý kanál při trase 5 a 35 km, vzestupný směr	106
84	Optické spektrum při trase 5 a 35 km, sestupný směr	106
85	Optické spektrum při trase 5 a 35 km, vzestupný směr	107
86	Přenosová rychlost videa MPEG-2 576p při 0 km trase a 0 km metalické trasy u VDSL2	114
87	Přenosová rychlost videa MPEG-2 576p při 10 km trase a 2,5 km metalické trasy u VDSL2	114
88	Přenosová rychlost videa MPEG-4 720p při 0 km trase a 0 km metalické trasy u VDSL2	114
89	Přenosová rychlost videa MPEG-4 720p při 10 km trase a 2,5 km metalické trasy u VDSL2	115
90	Přenosová rychlost videa MPEG-4 1080p při 0 km trase a 0 km metalické trasy u VDSL2	115
91	Přenosová rychlost videa MPEG-4 1080p při 10 km trase a 2,5 km metalické trasy u VDSL2	115
92	Hodnoty parametru MSE u unicastového provozu, VDSL2	116
93	Hodnoty parametru PSNR u unicastového provozu, VDSL2	116
94	Hodnoty parametru SSIM u unicastového provozu, VDSL2	116
95	Hodnoty parametru MSE u unicastového provozu, VDSL2 - MPEG-2 1080p . .	117
96	Hodnoty parametru PSNR u unicastového provozu, VDSL2 - MPEG-2 1080p . .	117
97	Hodnoty parametru SSIM u unicastového provozu, VDSL2 - MPEG-2 1080p . .	118
98	Prostředí programu vmware	124
99	Výpis souboru sip.conf	124
100	Výpis souboru extensions.conf	125
101	Výpis při registraci koncového zařízení	125
102	Nastavení vysílání videa krok 1 a 2	125

103	Nastavení vysílání videa krok 3 a 4	126
104	Nastavení vysílání videa krok 5 a 6	126
105	Krok pro přijímání videa na straně uživatele	127
106	Webová stránka datového serveru	128
107	Spuštění virtuálního stroje - krok 1 a 2	129
108	Spuštění virtuálního stroje - krok 3 a 4	129
109	Spuštění virtuálního stroje - krok 5 a 6	130
110	Spuštění virtuálního stroje - krok 7 a 8	130
111	Spuštění virtuálního stroje - krok 9 a 10	130
112	Spuštění virtuálního stroje - krok 11 a 12	131
113	Spuštění virtuálního stroje - krok 13	131
114	IxChariot - nastavení konfigurace testu	132
115	IxChariot - vyhodnocení	132
116	Nastavení a průběh testu	133
117	Optické spektrum při trase 0 km	134
118	Optické spektrum při trase 5 km	134
119	Optické spektrum při trase 10 km	135
120	Optické spektrum při trase 15 km	135
121	Optické spektrum při trase 20 km	135
122	Optické spektrum při trase 25 km	136
123	Optické spektrum při trase 30 km	136
124	Optické spektrum při trase 35 km	136
125	Optické spektrum při trase 35 km	137
126	Diagram oka pro první kanál při trase 5 km	137
127	Diagram oka pro první kanál při trase 10 km	138
128	Diagram oka pro první kanál při trase 15 km	138
129	Diagram oka pro první kanál při trase 20 km	138
130	Diagram oka pro první kanál při trase 25 km	139
131	Diagram oka pro první kanál při trase 30 km	139
132	Diagram oka pro první kanál při trase 35 km	139
133	Diagram oka pro první kanál při trase 5 km	140
134	Diagram oka pro první kanál při trase 10 km	140
135	Diagram oka pro první kanál při trase 15 km	140
136	Diagram oka pro druhý kanál při trase 20 km	141
137	Diagram oka pro druhý kanál při trase 25 km	141
138	Diagram oka pro druhý kanál při trase 30 km	141
139	Diagram oka pro druhý kanál při trase 35 km	142

Seznam tabulek

1	Porovnání jednotlivých standardů PON	26
2	Přehled přípojek xDSL	37
3	Porovnání HDSL na 2 a 3 párech vedení	38
4	QoS požadavky pro různé aplikace [17]	43
5	MOS (Mean Opinion Score)	48
6	Útlum optických tras	62
7	Měření chromatické disperze na optických trasách	63
8	Měření polarizačně vidové disperze na optických trasách	64
9	Parametry pro 1 kanál ve směru downstream	64
10	Parametry pro 1 kanál ve směru upstream	65
11	Zvolené profily pro ADSL2+ a VDSL2	66
12	Naměřené přenosové rychlosti pro profil na portu 10 u ADSL2+	66
13	Naměřené přenosové rychlosti pro profil na portu 10 u VDSL2	68
14	Nastavené parametry pro test EtherSAm ITU-T Y.1564 - ADSL2+	78
15	Nastavené parametry pro test EtherSAM ITU-T Y.1564 - VDSL2	81
16	Vzorky videí pro testování IPTV	86
17	Průměrná přenosová rychlost vybraných videí u ADSL2+	87
18	Průměrná přenosová rychlost vybraných videí u VDSL2	88
19	Ztrátovost paketů vybraných vzorků videí u ADSL2+	89
20	Ztrátovost paketů vybraných vzorků videí u VDSL2	91
21	Použité kodeky pro testování	99
22	Naměřené hodnoty MOS a R-faktoru u profilu ADSL2+	100
23	Naměřené hodnoty MOS a R-faktoru u profilu VDSL2	100
24	Naměřené přenosové rychlosti u ADSL2+	101
25	Naměřené přenosové rychlosti u VDSL2	101
26	Nastavené globální parametry pro simulaci	102
27	Nastavení optického výkonu	103
28	Parametry optického vlákna pro jednotlivé délky tras	104
29	Hodnoty parametru MSE, ADSL2+	119
30	Hodnoty parametru PSNR, ADSL2+	119
31	Hodnoty parametru SSIM, ADSL2+	120
32	Hodnoty parametru MSE pro mutlicast, VDSL2	121
33	Hodnoty parametru PSNR pro mutlicast, VDSL2	121
34	Hodnoty parametru SSIM pro mutlicast, VDSL2	122
35	Hodnoty parametru MSE pro unicast, VDSL2	122
36	Hodnoty parametru PSNR pro unicast, VDSL2	123
37	Hodnoty parametru SSIM pro unicast, VDSL2	123

1 Úvod

Tématem diplomové práce jsou heterostrukturní sítě, které se skládají z optické a metalické sítě. V současné době jsou požadavky zákazníků na poskytované služby vyšší, a proto poskytovatelé řeší, jak nejlépe jejich požadavkům vyhovět. Pro přenos dat se využívají technologie DSL, které využívají stávajících symetrických telefonních metalických kabelů. Avšak jejich nevýhodou je velký pokles přenosových rychlostí s rostoucí délkou trasy. Řešením je využití optických přístupových sítí co nejbližší ke koncovým uživatelům a využití metalických kabelů až pro tzv. poslední míli.

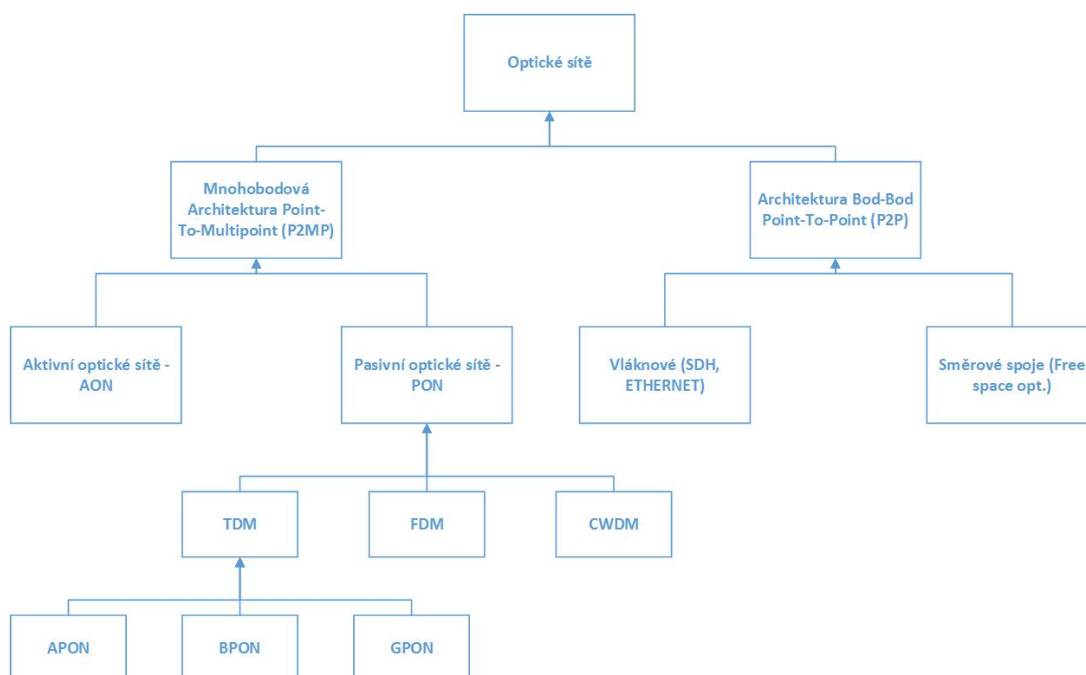
Diplomová práce bude rozdělena na dvě části, teoretickou část a praktickou část. Teoretická část se bude skládat z pěti kapitol. První kapitola se budou zabývat úvodem do optických sítí, používanými topologiemi a FTTx technologií pro poslední míli. V dalších dvou kapitolách budou rozebrány jednotlivé standardy pasivních optických sítí a přehled technologie nové generace PON. Následující kapitola se bude věnovat přehledu DSL technologií. V poslední kapitole teoretické části budou rozebrány Triple Play služby a jejich objektivní a subjektivní metody hodnocení.

Praktická část diplomové práce se bude skládat ze čtyř kapitol. V první kapitole bude popsána infrastruktura vytvořené hybridní xWDM/xDSL sítě, včetně používaných měřících přístrojů a zařízení. Dále zde budou vyhodnoceny výsledky při měření optických tras, spektrální analýza komunikačního kanálu a přenosové vlastnosti ADSL2+ a VDSL2 profilů. Druhá kapitola praktické části se bude věnovat prověřování integrity sítě pomocí testů RFC 2544 a ITU-T Y.1564 EtherSAM pro různé kombinace optických a metalických tras. Další kapitola se bude zaměřovat na nasazení Triple Play služeb na vytvořenou hybridní síť. Triple play služby budou analyzované objektivními metodami. Audiovizuální služba bude hodnocena pomocí softwaru MSU Video Measurement Quality Tool na základě objektivních metod MSE, PSNR a SSIM při multicastovém i unicastovém provozu. Pro analýzu videa bude využito i přístroje AXS-200/625 pro měření přenosové rychlosti a ztrátovosti paketů videa. Hlasová služba bude analyzovaná pomocí nástroje IxChariot, kde budou sledovány hodnoty MOS a R-faktoru. Datová služba bude analyzována pomocí softwaru BWMeter, který umožňuje sledovat datový přenos v downstreamu i v upstreamu. Veškeré služby budou analyzovány pro různé kombinace délek optických a metalických tras.

Poslední kapitola praktické části bude zaměřena na vytvoření optické sítě v simulačním prostředí Optiwave OptiSystem na základě změřených dat v reálném zapojení a budou se sledovat tyto parametry: bitová chybovost, Q-faktor, diagram oka a spektrální analýza. Praktické měření bude probíhat na budově FEI v laboratořích POREB211, POREB215, POREB315 a POREB316.

2 Optická přístupová síť

V současnosti jsou větší požadavky na přenosovou kapacitu v koncových bodech sítě a například služeb Triple Play (IPTV, VoIP, data). Z toho důvodu se v oblasti přístupu ke službám v telekomunikacích nasazují optická vlákna co nejbližší k účastníkům. Optické přístupové sítě nejsou novým konceptem, naopak se o nich uvažovalo jako přístup uživatele k síti už dříve. První návrhy jsou datovány na přelomu 70-80 let. Nicméně od toho bylo odstoupeno, jelikož technologie nebyla dostatečně vyspělá. Což je velice důležité vzhledem k vysokým nákladům spojených s tím, že neexistovala poptávka na šířku pásma, která byla vyžadována pro nasazení do sítě. Optické přístupové sítě pomohly vyřešit různé problémy, např: vyšší počet účastníků, větší objem datové komunikace a nárůst požadavků k navázání nových služeb. Optické přístupové sítě můžeme dělit do dvou skupin na aktivní optické sítě AON (Active Optical Network) a pasivní optické sítě PON (Passive Optical Network). Dále se mohou rozdělit podle optického přístupu na architekturu a to na architekturu bod – bod a na mnohobodovou architekturu. Základní rozdělení můžeme vidět na obrázku 1. V posledních několika letech, byly telekomunikačním průmyslem studovány různé PON architektury a technologie a několik PON norem bylo schváleno organizacemi ITU-T a IEEE. FTTx se stává vyspělou technologií v přímém souboji s měděnými kabely [1].



Obrázek 1: Základní rozdělení optických přístupových sítí

2.1 Funkční bloky Optické přístupové sítě

Mezi základní funkční celky optických přístupových sítí patří:

- **OLT** (Optical Line Termination) - Optické linkové zakončení se nachází na straně sítě a zajišťuje síťové funkce mezi přístupovou sítí a sítěmi telekomunikačních služeb.
- **ODN** (Optical Distribution Network) - Optická distribuční síť je soubor optických přenosových prostředků mezi OLT a ONU jednotkami. ODN je tvořena optickými vlákny, konektory, spojkami, vlnovými filtry a rozbočovači.
- **ONU** (Optical Network Unit) - Optické síťové jednotky zabezpečují funkce mezi optickou a metalickou částí přístupové sítě. Převádějí optický signál přenášený vláknem na signál elektrický, který je dále poslán ke koncovým uživatelům.
- **ONT** (Optical Network Terminal) - Optické síťové zakončení zajišťují propojení koncových účastníků a přístupové sítě.

2.2 FTTX

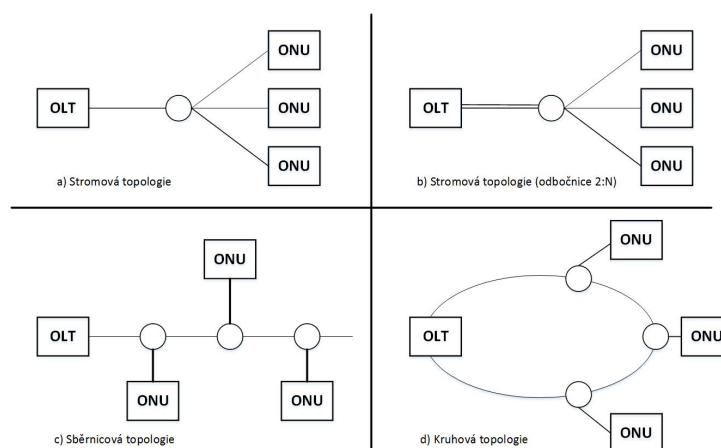
FTTX (Fiber To The x) představuje řešení přístupových sítí na optických vláknech. Písmeno "X" značí, kde se na dané trase nachází ONU/ONT jednotky, od kterých dále pokračuje metalické vedení.

- **FTTH** (Fiber To The Home) - optická vlákna jsou přivedena až do domu a jsou zakončena u uživatelů. To znamená, že je zde délka metalického vedení omezena na minimum.
- **FTTB** (Fiber To The Building) - optická vlákna jsou přivedena do vyhrazených prostorů budov. Zde je umístěný rozvaděč, ke kterému se připojují uživatelé pomocí metalického vedení.
- **FTTC** (Fiber To The Curb) - optická vlákna jsou přivedena k venkovnímu rozvaděči, který se nachází na okraji chodníku. V tomto rozvaděči jsou nainstalovány ONU jednotky a uživatelé jsou k nim připojeni pomocí metalických kabelů. Vzdálenost uživatelů od ONU je do 300 metrů.
- **FTTN** (Fiber To The Node) - optická vlákna jsou přivedena do distribučního uzlu, který se nachází více jak 300 metrů od koncových uživatelů. Ti, se opět připojují pomocí metalických kabelů. Výhodou je, že se může připojit až několik stovek uživatelů.
- **FTTO** (Fiber To The Office) - optická vlákna jsou přivedena do kanceláře. Jedná se o podobnou technologii jako u FTTH, ale je primárně určena pro připojení do kancelářských prostorů.
- **FTTCab** (Fiber To The Cab) - optická vlákna jsou přivedena do rozvaděče podobně jako u FTTC. Rozdíl je pouze ve vzdálenosti uživatelů od ONU.

2.3 Topologie sítě

V současné době se nejčastěji používají tyto topologie:

- Strom
- Strom s redundantním kmenem (2:N odbočnice)
- Sběrnice
- Kruh



Obrázek 2: Topologie sítě

2.3.1 Stromová topologie

Stromová topologie je nejběžněji používaná topologie v přístupových sítích využívající jedno vlákno z OLT do děliče. Z tohoto děliče jsou vedena vlákna k jednotlivým ONU jednotkám. V podstatě se stromová topologie skládá z kaskádově postavených děličů. Topologie s jedním děličem se nazývá hvězdicová topologie.

Hlavní výhodou této topologie je to, že k rozdělení dochází pouze v jednom bodě, a tak je jednoduché detekovat problém v síti. Další výhodou je, že všechny ONU jednotky mají stejnou spotřebu výkonu. To znamená, že všichni přijímají optický signál stejné kvality.

Výhodou hvězdicové topologie je přechod z úzkopásmové technologie poslední míle (až 2 Mbit/s na uživatele) na širokopásmové přístupové sítě (minimálně 1 Gbit/s sdílené kapacity na ONU jednotku), protože je jednoduchý a efektivní. Pokud se zvýší počet odběratelů, tak se jednoduše může topologie rozdělit do několika podsítí přidáním děliče a OLT jednotky, čímž se získá univerzální a flexibilní architektura pro rozšiřování sítě. Běžné topologie typu hvězda zahrnují pasivní optické děliče typu hvězda, které jednoduše rozdělují optický výkon nezávisle na vlnové délce a portu.

Hvězdicová topologie má nevýhodu ve spolehlivosti, kdy výpadek centrálního zařízení může způsobit výpadek celé sítě. Nicméně porucha pasivního vysílacího prvku je nepravděpodobná. Avšak existuje několik poruch, které mohou nastat. Například selhání zesilovače, selhání připojení portů v přístupových uzlech, porucha přijímače nebo vysílače, nebo poruchy kabeláže v síti. Taková selhání většinou vedou k poruše jednoho či více ramen této topologie. Pokud je porucha mezi OLT jednotkou a děličem, pak je ovlivněna veškerá komunikace. Další nevýhodou je to, že dostupná šířka pásma je sdílena se všemi uživateli na spojení mezi OLT a optickým děličem. Průměrná kapacita na jednoho uživatele je počet vlnových délek vynásobený přenosovou rychlostí na jednu vlnovou délku a vydělen celkovým počtem uživatelů.

Jako příklad můžeme uvést: osm vlnových délek s rychlostí 2,5 Gbit/s je sdíleno mezi 200 uživatelů. To znamená, že průměrná kapacita na jednoho uživatele je 100 Mbit/s. Pokud má být tato hodnota zaručena, pak musí být provoz omezen na tuto přenosovou rychlost. To způsobuje zhoršení využití trasy, protože ne vždy všichni zákazníci tuto kapacitu využijí [2].

2.3.2 Stromová topologie s redundantním kmenem (2:N odbočnice)

Tato topologie je identická se standardní stromovou topologií. Jediný rozdíl je v tom, že k OLT jednotce jsou připojeny dvě vlákna pro účely odolnosti. V případě, že je jedno vlákno poškozeno, tak přenos probíhá přes druhé vlákno. Nicméně aby nedošlo k poškození obou vláken ve stejnou dobu, tak je každé vlákno instalováno zvlášť do jiného kmene. Avšak, optický hvězdicovitý dělič musí obsahovat aktivní přepínací zařízení, které může zvolit spojení k/od OLT jednotky. Nebo musí distribuovat celý datový tok dvakrát do všech ONU jednotek. V takovém případě se snižuje maximální kapacita na jednu ONU jednotku na polovinu. Nicméně, za předpokladu že u děliče zdaleka nepřesahuje realistický dělicí poměr 1:2. Obecně toto omezení nesnižuje maximální počet uživatelů s garantovanou přenosovou rychlostí. Kombinace těchto základních topologií nabízí vyšší hustotu a lepší pokrytí dvourozměrných oblastí. Nejslibnější přístup pro poskytnutí odolnosti v distribuci a optimalizace délky vlákna v přístupových částech sítě, je kombinace primárního kruhu a sekundárních stromů. Dalším zajímavým přístupem je dvojitý kruh, který poskytuje odolnost primární i sekundární části přístupové sítě, ale je potřeba využití složitějšího přístupového protokolu a je potřeba použít větší množství vláken [2].

2.3.3 Sběrníková topologie

Sběrníková topologie využívá jedno optické vlákno z OLT jednotky, proto se potýká se stejnými problémy s využitím kapacity jako stromová topologie. Každý koncový uživatel je připojen pomocí spojky, která čerpá jen část výkonu, který je vysílán z OLT. Výhodou této topologie je, že využívá minimální množství optického vlákna (pokud jsou ONU jednotky spojeny přímo se spojkou). Další výhodou je, že umožňuje flexibilní připojení nové ONU jednotky přidáním další spojky. Hlavním problémem je snižování kvality signálu při průchodu každé spojky, jelikož si

každá spojka bere část výkonu. To vede ke zhoršení signálu u ONU jednotek, které jsou nejdále [2].

2.3.4 Kruhová topologie

Kruhová topologie se hlavně používá v metropolitních sítích, protože nabízí odolnost s minimálním počtem spojů. Díky tomu, že existují dvě možné cesty, jak dosáhnout k OLT, je možné navázat a udržet datové spojení i v případě poškození jednoho vlákna. K tomu je potřeba dvou vláken vedených od OLT a složitějšího vybavení s přepínacími schopnostmi u ONU jednotek, aby bylo možné posílat i přijímat signál z obou směrů kruhové topologie. U kruhové topologie nastává stejný problém jako u sběrníkové topologie, protože i zde dochází k zhoršení signálu při průchodech každé ONU. Tento faktor omezuje přenosové schopnosti a počet ONU, které mohou být připojeny k této topologii. I kapacita je sdílena mezi jednotlivé ONU, a jelikož druhé vlákno z OLT nezvyšuje kapacitu sítě, tak i proto je celkový počet koncových uživatelů omezen stejně jako u stromové a sběrníkové topologie [2].

3 PON síť

PON (Passive Optical Network) je zkratka pro pasivní optické síť. To znamená, že mezi centrální ústřednou a koncovými uživateli nemají aktivní prvky. Ty existují pouze v ústředně a v uživatelském prostoru. Z ústředny vede jedno jednovidové optické vlákno k pasivnímu optickému děliči 1:N, kdy výstupní porty děliče jsou připojeny ke koncovým uživatelům pomocí jednotlivých jednovidových vláken. Optická vlákna a pasivní prvky, které se nacházejí mezi ústřednou a uživatelským prostředím se nazývají optická distribuční síť. Počet podporovaných uživatelů se může pohybovat od 2 do 128, ale typicky se jedná o 16, 32 a 64 koncových uživatelů. TDM – PON je typ pasivních optických sítí, které využívají multiplex s časovým dělením, kdy je využita pouze jedna vlnová délka v diplexním, duplexním módu nebo za použití dvou vláken. OLT vysílá data v sestupném směru na vlnové délce 1490 nm a video vysílá na vlnové délce 1550 nm. Ve vzestupném směru jsou data vysílána z ONU na vlnové délce 1310 nm. Aby se předešlo kolizím, tak vzestupný směr využívá protokol mnohonásobného přístupu, který přiděluje časový slot každému uživateli [2][3].

Níže jsou popsány jednotlivé standardy a v tabulce 1 je jejich porovnání.

3.1 APON

APON (ATM-PON) byl první schválený standard Mezinárodní telekomunikační unií ITU v roce 1998 jako standard ITU-T G.983. Původní standard vydaný v roce 1998 udával přenosové rychlosti dat na 155,52 Mbit/s a 622,08 Mbit/s. Novější verze standardu z roku 2005 přidala ještě rychlost 1244,14 Mbit/s pro sestupný směr. Poskytovatelé APON mohou implementovat symetrické i asymetrické přenosové rychlosti [3].

3.2 BPON

BPON (Broadband PON) byl standardizován jako doporučení ITU G.983.1,.2,.3 a .4. Tento standard má dvě výhody a to, že poskytuje třetí vlnovou délku 1550 nm pro video služby a že, se jedná o stabilní standard, který opětovně využívá ATM infrastruktury. Pro symetrický přenos je maximální přenosová rychlost 622,08 Mbit/s [4][3].

3.3 GPON/XG-PON

V roce 2003 organizace ITU-T vytvořila standard G.984 pro gigabitovou pasivní optickou síť (GPON). GPON není jenom zlepšení BPON, ale je specifikován s podporou vyšší přenosové rychlosti, lepším zabezpečením s pokročilým šifrováním a dalšími funkcemi. GPON dále podporuje Ethernet protokol a významně zvyšuje efektivitu šířky pásma začleněním GPON metody zapouzdření (GEM).

V GPON dosahuje celková přenosová rychlost v obou směrech až 2,488 Gb/s v dodatku k původním přenosovým rychlostem 155,52 Mb/s, 622,08 Mb/s a 1,244 Gb/s. Většinou se GPON

nasazuje s přenosovou rychlostí 2,488 Gb/s v sestupném směru a s přenosovou rychlostí 1,244 GB/s ve vzestupném směru.

XG-PON (X Gigabit PON) je nástupcem GPON a byl standardizován roku 2010 dle ITU-T G.987. Tento standard pracuje na vlnových délkách 1575 - 1580 nm v sestupném směru a 1260 - 1280 nm ve vzestupném směru. Maximální přenosová rychlost je 9,95328 Gbit/s ve vzestupném i v sestupném směru[1][5].

3.4 EPON/10GEAPON

EPON (Ethernet PON) je přírůstkem ethernetové rodiny. Práce na EPON započala v březnu 2001 studijní skupinou IEEE 802.3ah a byla dokončena v červnu 2004. Ethernet pokrývá fyzickou a datovou vrstvu v referenčním modelu OSI.

V standardu jsou popsány dva typy rozhraní s různými optickými výkony a dynamikou. První typ má označení 1000 Base-PX10 a je určen pro vzdálenosti do 10 a rozbočením k maximálně 16 ONT. Druhý typ se označuje 1000 Base-PX20 a je určen pro vzdálenosti do 20 km a rozbočením větším než k 16 ONT. EPON pracuje pouze v symetrickém provozu s rychlosti 1,25 Gb/s. a využívá vlnové délky 1260 až 1360 nm pro vzestupný směr a vlnové délky 1480 až 1550 nm pro sestupný směr.

10GE-PON (10 Gigabit EPON) navazuje na standard EPON. Byl specifikován institucí IEEE jako standard 802.3av v roce 2009. Tento standard pracuje na stejných vlnových délkách jako standard EPON, plus zde byly přidány vlnové délky 1575-1580 nm. Na rozdíl od EPON nabízí i asymetrický přenos. Přenosové rychlosti jsou 10,3125 Gb/s u symetrického přenosu a u asymetrického přenosu je přenosová rychlost 10,3125 Gb/s v sestupném směru a 1,244 Gb/s ve vzestupném směru[3][6].

Tabulka 1: Porovnání jednotlivých standardů PON

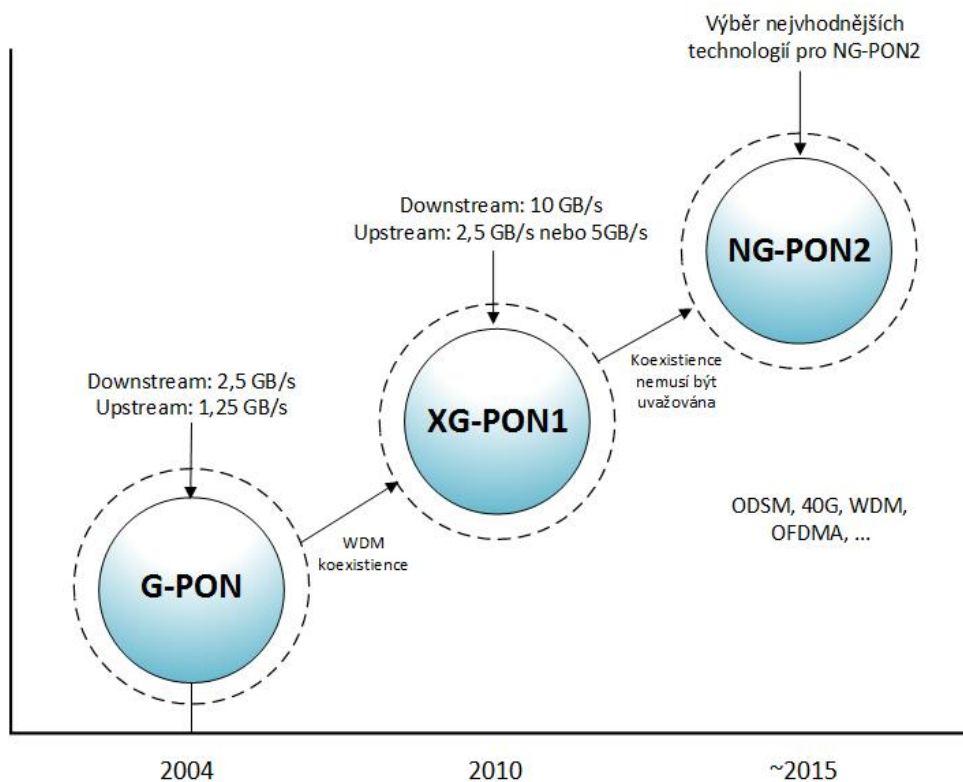
Varianta PON	APON	BPON	GPON	EPON	10GE-PON	XG-PON
Standard	ITU-T G.938.1 (1998)	ITU-T G.938.3 (2001)	ITU-T G.984.1 (2003)	IEEE 802.3ah (2004)	IEEE 802.3av (2009)	ITU-T G.987 (2010)
Protokol	ATM	ATM	ATM/GEM	Ethernet	Ethernet	XGEM
Max. rozbočovací poměr	1:32	1:32	1:128	1:32	1:32	1:256
Dosah [km]	20	20	20	20	20	20
Max přenosová rychlost Upstream [Mbit/s]	155,52	622,08	2488,32	1250	10312	9953
Max přenosová rychlost Downstream [Mbit/s]	622,08	1244,16	2488,32	1250	10312	9953
Vlnová délka Upstream [nm]	1260-1360	1260-1360	1260-1360	1260-1360	1260-1360	1260-1280
Vlnová délka Downstream [nm]	1480-1500	1480-1500	1480-1500	1480-1500	1575-1580	1575-1580

4 Technologie NG-PON

NG-PON (Next generation passive optical network) je další generací pasivních optických sítí. Tyto sítě nabízí komunikaci P2MP neboli point-to-multi-point a je oblíbeným řešením pro nasazení v FTTx sítích.

O směr evoluce NG-PON se starala pracovní skupina FSAN (Full Service Access Network), která pracovala na specifikaci XG-PON1 (série ITU-T G.987). Jedná se o technologii s kapacitou 10 Gbit/s v sestupném směru a s kapacitou 2,5 Gbit/s vzestupným směru. Tato technologie využívá časového dělení TDMA.

Od doby dokončení práce na XG-PON1 se tato skupina zaměřila na technologie NG-PON2 (série ITU-T G.989). Tyto technologie mají kapacitu až 40 Gbit/s a mají zvýšený počet poměru kanálů. Tato druhá generace je založena na vlnovém multiplexu WDM a vzniku hybridních WDM-TDM PON přístupových sítí[9].



Obrázek 3: Evoluce NG-PON technologie dle FSAN

4.1 WDM-PON

V posledních letech se využívali technologie založené na časovém dělení TDMA, které se postupně blíží z pohledu přenosových parametrů k pomyslné výkonnostní hranici. A proto vznikla technologie WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing PON), která je generací pasivních optických sítí, jenž pro přenos využívá vlnový multiplex WDM. WDM multiplex umožňuje umístění většího množství oddělených vlnových délek do jednoho vlákna. Pro dosažení maximálních přenosových rychlostí se volí kombinace vlnového dělení s časovým. Jedná se o hybridní optické přístupové sítě WDM-TDM PON.

4.1.1 Vlnový multiplex

Technologie WDM (Wave Division Multiplex) umožňuje přenos jednotlivých vlnových délek samostatně po jednom vlákne. To znamená, že každému koncovému uživateli je přidělena jedna vlnová délka. To umožňuje uživateli využít nejvyšší poskytované přenosové rychlosti.

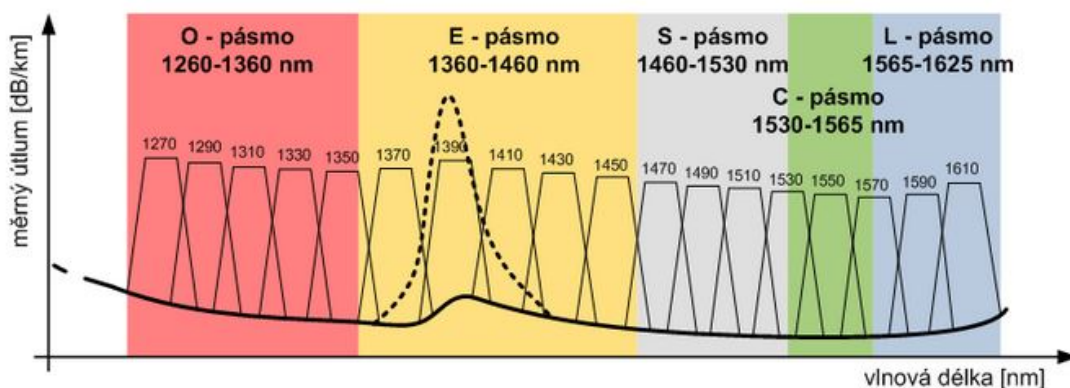
4.1.2 CWDM

Technologie "hrubý" vlnový multiplex CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplex) byl specifikován v doporučení ITU-T G.694.2. Jsou zde definovány relativně široké kanály a dostatečná tolerance pro oddělení jednotlivých nosných z důvodu použití levnějších optických zdrojů s širší spektrální charakteristikou a s nižší přesností a stabilitou vlnové délky generovaného zařízení.

Pro CWDM byly definovány kanály s první nosnou 1270 nm a poslední 1610 nm, kdy odstup mezi jednotlivými kanály je 20 nm s tolerancí nosné $\pm 6,5$ nm. Technologie CWDM se využívá na úrovni metropolitních sítí.

Technologie CWDM pro standardní jednovidové vlákno 9/125 μm je definováno 18 kanálů rozdělených do následujících pásem:

- **Pásmo O** (Original - původní) - vlnové délky 1260-1360 nm, nosné číslo 1-5.
- **Pásmo E** (Extended - rozšířené) - vlnové délky 1360-1460 nm, nosné číslo 6-10 (počítá se s optickým vláknem s potlačenými ionty OH-, v obr. 1 naznačeno čárkovaně).
- **Pásmo S** (Short - krátké) - vlnové délky 1460-1530 nm, nosné číslo 11-14.
- **Pásmo C** (Conventional - konvenční) - vlnové délky 1530-1565 nm, nosná číslo 15.
- **Pásmo L** (Long - dlouhé) - vlnové délky 1565-1625 nm, nosné číslo 16-18 [7] [8].



Obrázek 4: Kanály CWDM definované dle ITU-T G.694.2 [7].

4.1.3 DWDM

Technologie DWDM (Dense Wavelength Division Multiplex) neboli "hustý" vlnový multiplex je specifikován v doporučení ITU-T G.694.1. Patří mezi nejdokonalější technologie, které se v optoelektronice používají. U DWDM multiplexování se využívají C a L pásma, které dokážou pracovat s minimálním rozestupem kanálů. Odstup mezi kanály je 0,1 nm u UDWDM (Ultra DWDM) až po 0,8 nm. Aby se dosáhlo malých rozestupů mezi jednotlivými kanály, tak se musí použít co nejpřesnější optické zdroje a přesné optické filtry. Tím rostou celkové náklady na provoz, které jsou větší než u technologie CWDM [2][8].

DWDM multiplexování umožňuje využití čtyř druhů kanálů s různou šířkou:

- Kanály se šířkou 12,5 GHz - odpovídají rozteči vlnových délek cca 0,1 nm.
- Kanály se šířkou 25 GHz - odpovídají rozteči vlnových délek cca 0,2 nm.
- Kanály se šířkou 50 GHz - odpovídají rozteči vlnových délek cca 0,4 nm.
- Kanály se šířkou 100 GHz - odpovídají rozteči vlnových délek cca 0,8 nm.

4.1.4 WWDM

Technologie WWDM (Wide Wavelength Division Multiplex) se označuje jako "široký" vlnový multiplex a spadá pod starší technologie, které se využívají i v dnešní době. A to z důvodu nízkých nákladů pro vytvoření optické sítě. Vlnový multiplex WWDM používá vlnové délky v oblasti 1310 nm s odstupem 20 nm mezi jednotlivými vlnovými délkami. Nejčastěji se využívá pro přenos Gigabit a 10Gigabit Ethernetu.

4.1.5 Výhody a nevýhody WDM-PON

WDM-PON nabízí tyto výhody [3]:

- Optický rozbočovač je pasivní, a proto je nízko náročný na údržbu a má vysokou spolehlivost.
- Každý uživatel přijímá vlastní vlnovou délku, a proto WDM-PON nabízí vynikající ochranu soukromí.
- Mezi OLT a ONU je zajištěno P2P spojení a není potřeba P2MP ovladačů přístupových médií. To značně zjednodušuje MAC vrstvu. Neexistuje zde omezení pro překlenutí vzdálenosti z důvodu rozsahu.
- Jednoduché zpoplatnění při povýšení služby. Kdy každá vlnová délka u WDM-PON může využívat různé rychlosti s různými protokoly. Proto si jednotlivý uživatel platí jen za svůj vlastní upgrade.

Mezi nevýhody WDM-PON patří [3]:

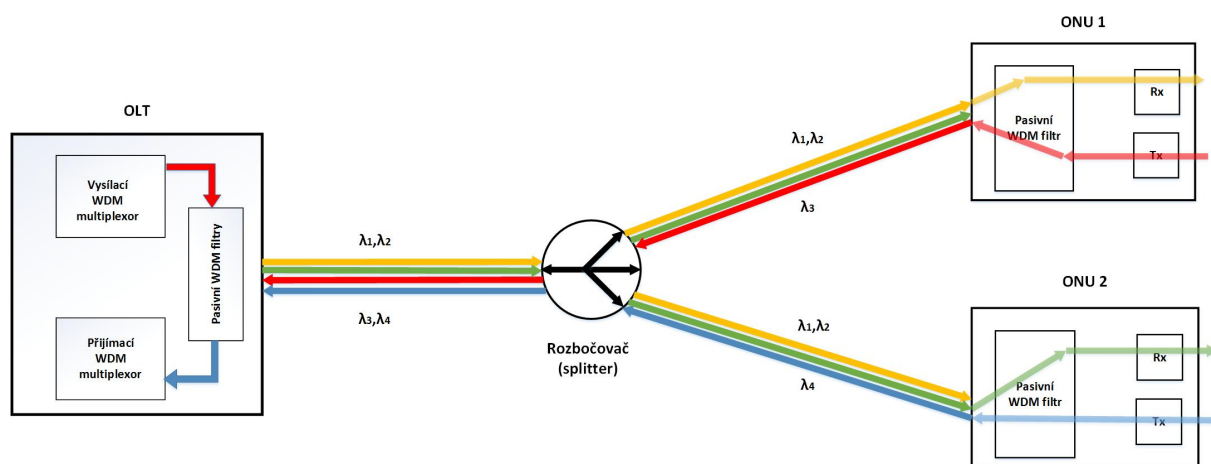
- Vysoké náklady WDM komponentů, nicméně náklady WDM komponentů v posledních letech klesly.
- Kontrola a udržování teploty. Vlnové délky WDM komponentů mají tendenci měnit teplotu okolí. Udržení požadované teploty znamená, že nároky na energii vyžadují aktivní elektronické součástky v optické distribuční síti.
- U WDM-PON potřebuje každá ONU jednotka jinou vlnovou délku pro upstream (vzestupné) připojení

4.1.6 Varianty WDM-PON

První varianta WDM-pon počítá jen s pevně přidělenými vlnovými délkami individuálně všem koncovým jednotkám ONU/ONT. Například při připojení 16 ONU jednotek do optické sítě jsou pro vzestupný směr použity vlnové délky λ_1 - λ_{16} . Pasivní rozbočovač provede rozdělení optického signálu do všech koncových jednotek. Každé ONU/ONT jednotky mají pevně definované filtry, pomocí kterých si vydělí ze všech vlnových délek λ_1 - λ_{16} právě tu část optického signálu, který patří dané ONU/ONT jednotce. Ve vzestupném směru má každá koncová jednotka přidělenou vlastní vlnovou délku, na které vysílají. Z hlediska architektury sítě se jedná o soubor přípojek typu bod-bod. Komunikace každé ONU/ONT jednotky s OLT jednotkou probíhá na individuálně vyhrazených vlnových délkách. Dále pro koncové jednotky je vyhrazena jedna společná vlnová délka, která slouží pro vysílání broadcastu.

Nevýhodou tohoto řešení je odposlech provozu, kdy jsou v sestupném směru všechny vlnové délky šířeny všem koncovým jednotkám. Proto je nutné zajistit šifrování, aby se zabránilo

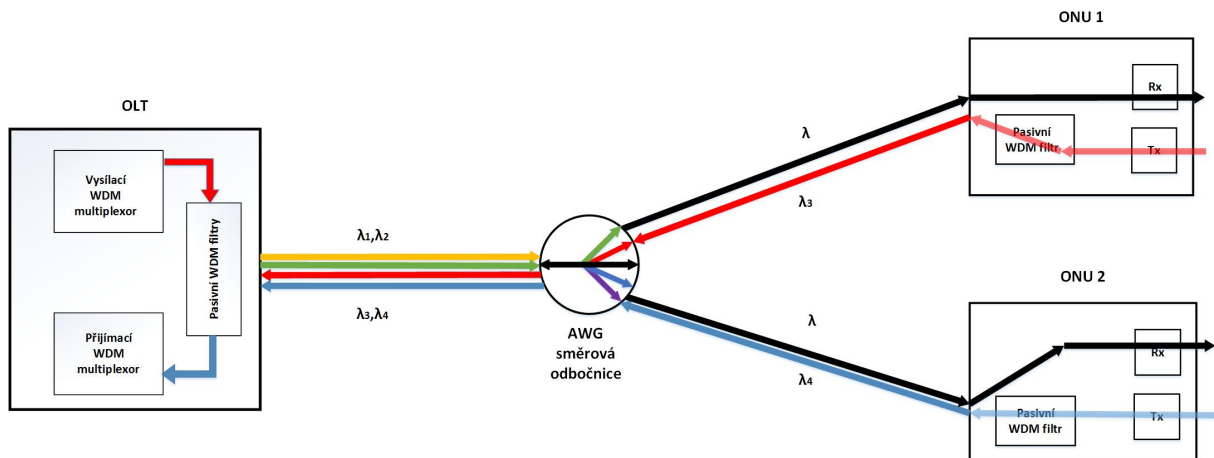
případnému odposlechu. Další nevýhodou je vysoký vložný útlum způsobený pasivním rozbočovačem, který výrazně limituje počet připojených koncových jednotek. Dále nemohou být v této síti zapojeny dvě jednotky využívající stejnou vlnovou délku. Musí být k dispozici tolik různých jednotek, které využívají různou vlnovou délku, kolik je různých uživatelů. Mezi další nevýhody patří i špatné hospodaření s přenosovou kapacitou. Například, když je jedna vlnová délka nevyužita, tak nemůže být zpřístupněna dalším uživatelům, kteří by potřebovali v daném okamžiku zvýšit přenosovou kapacitu.



Obrázek 5: WDM-PON s pasivním rozbočovačem

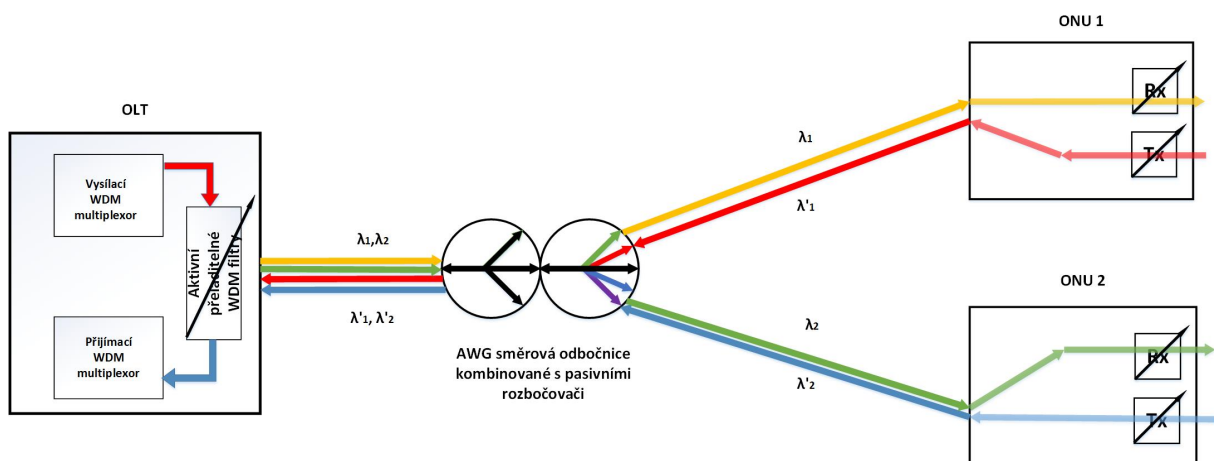
Druhá varianta využívá směrové odbočnice na bázi vydělování vlnových délek pomocí metody AWG (Arrayed Waveguide Grating). OLT jednotka vysílá optický signál, ve formě vlnového multiplexu nosných, pro jednotlivé koncové jednotky ONU/ONT. V předešlé variantě se posílali k jednotlivým koncovým jednotkám všechny vlnové délky. U této varianty se posílá ke koncové jednotce pouze ta vlnová délka, která je mu přidělena. Ve vzestupném směru zůstává princip stejný jako v první variantě, kdy každá koncová jednotka ONU/ONT vysílá svá data na její vyhrazené vlnové délce.

Výhodou této varianty je, že umožňuje jednoduše vydělovat přenášené vlnové délky a odbočovat je rovnoměrně do všech výstupů ve formě jednotné nosné. Na rozdíl od pasivního rozbočovače, použitého v první variantě, tak AWG směrová odbočnice má nižší vložný útlum. Ten se pohybuje kolem 5 dB nezávisle na počtu odchozích směrů a počtu použitých vlnových délek. Další výhodou této varianty je, že na vstupu koncových jednotek je odstraněn pasivní WDM filtr. To má za následek snížení celkového útlumu. Místo těchto filtrů jsou použité DFB lasery. V této variantě je také zvýšená bezpečnost přenosu v sestupném směru.



Obrázek 6: WDM-PON s využitím AWG směrové odbočnice

Třetí varianta pasivní optické sítě WDM-PON využívá kaskádového zapojení. Jedná se o kombinace AWG směrových odbočnic s pasivními optickými rozbočovači. K jednotlivým výstupům optického rozbočovače budou zapojeny AWG odbočnice. Při použití N AWG směrových odbočnic se dosáhne k větší přesnosti při vydělování jednotlivých vlnových délek. To by mělo umožnit použití hustého vlnového multiplexu DWDM. Dále pomocí přeladitelných filtrů v optických jednotkách získáme univerzální koncovou jednotku, která podle potřeby umožňuje přidělovat různé vlnové délky. Tento mechanismus se označuje jako DWA (Dynamic Wavelength Assignment).[7]



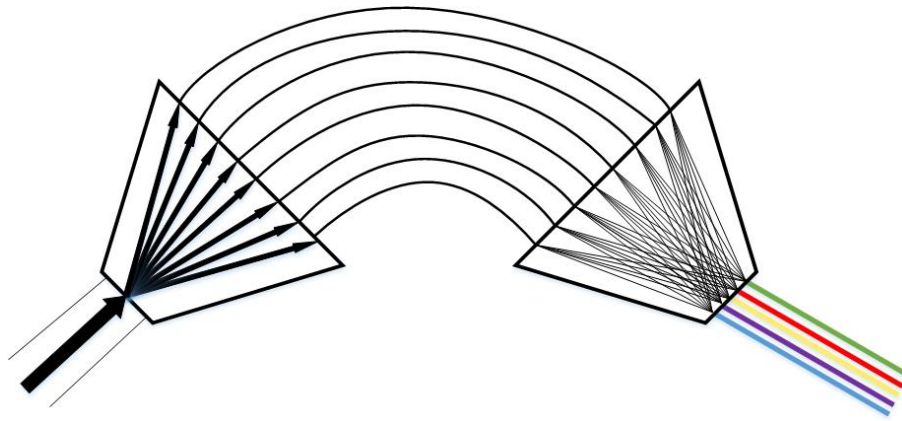
Obrázek 7: Kaskádní zapojení AWG odbočnic a pasivních rozbočovačů

4.1.7 AWG směrová odbočnice

Pasivní vlnová odbočnice AWG (Arrayed Waveguide Grating) je jedním ze základních prvků pro aplikace vlnového multiplexování v optických sítích. V jednom směru slouží pro pasivní vydělování

jednotlivých vlnových délek a v opačném směru slouží pro jejich slučování.

Optické signály jsou ze vstupní oblasti navázány do fázového pole AWG, tak aby vstupní signály měly vzhledem k sobě stejnou fázi. Fázové pole je tvořeno svazkem samostatných vlnovodů uspořádaných nejčastěji do soustředné kruhové či eliptické struktury tak, že mezi dvěma sousedními kanály je přesně definovaný rozdíl délky Δl . Ve fázovém poli dochází také ke vzájemnému fázovému posuvu mezi jednotlivými optickými signály. Tyto signály se šíří různě posunutými dráhami. Na výstupu je stejné pole jako na vstupu. V tomto poli dochází ke vzájemné interferenci posunutých signálů z výstupu fázového pole. Jelikož výsledná ekvifázová plocha z výstupu jednotlivých kanálků má pootočenou plochu o úhel úměrný směně vlnové délky, tak jsou tyto výstupy umístěny v interferenčních maximech jednotlivých vlnových délek. Díky tomu jsou jednotlivé vlnové délky odděleny ze vstupního signálu. AWG pracuje v obou směrech, kdy v opačném směru jsou jednotlivé vlnové délky slučovány v jeden optický signál na výstupu do vlákna. Na obrázku 8 je zobrazen princip vlnové odbočnice AWG [8] [10].



Obrázek 8: Princip de/multiplexace vlnových délek pomocí metody AWG

4.2 Opportunistic and dynamic spectrum management PON (ODSM-PON)

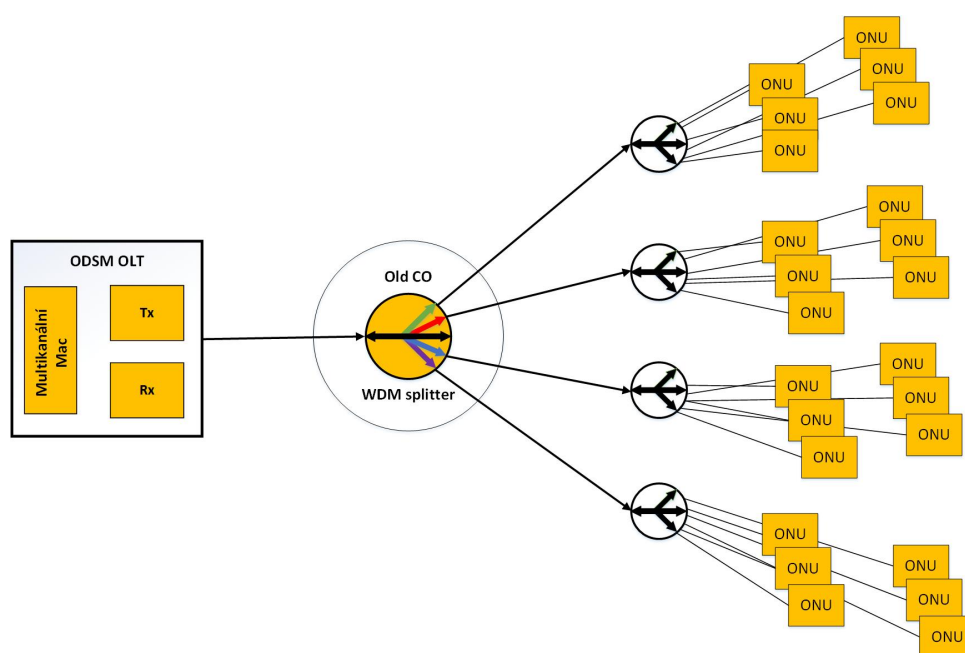
ODSM-PON je založena na oportunistickém a dynamickém řízení spektra PON. Tato metoda řeší požadavky operátorů na využití potenciálu nasazených sítí. V síti se nachází pouze ODSM OLT jednotka a bývalá centrální ústředna (Old CO). Centrální ústředna tentokrát vykonává funkci pasivního rozbočovače a dále slouží k rozšíření sítě. Tím je docíleno, že koncoví uživatelé mají k dispozici optické širokopásmové připojení za přijatelnou pořizovací cenu. V roce 2010 byl vytvořen návrh, ve kterém jsou čtyři GPON/XG-PON linkové karty v centrální ústředně nahrazeny pasivním WDM rozbočovačem. Přitom síť mezi centrální ústřednou a koncovými uživateli je beze změny. Tento návrh je zobrazen na obrázku 9.

V sestupném směru vysílá OLT jednotka optický signál o různých vlnových délkách. Na WDM splitteru jsou jednotlivé vlnové délky rozděleny a rozeslány ke koncovým uživatelům.

ODSM-PON ve vzestupném směru využívá vlnového i časového dělení. Data od koncových jednotek jsou přenášena přes WDM splitter do OLT jednotky.

ODSM přináší tyto výhody:

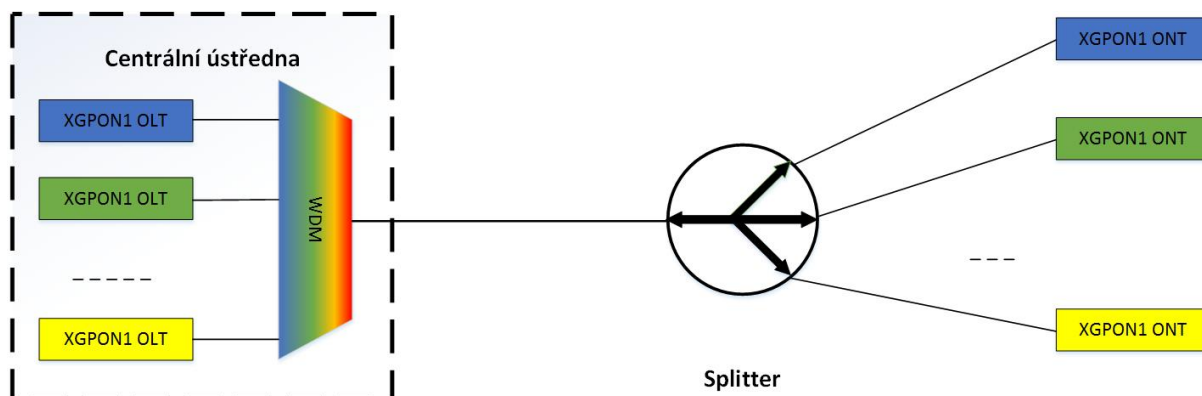
- Využívá stávající optickou distribuční síť ODN,
- zachování využití stávajících koncových jednotek,
- snížení pořizovacích nákladů a vyšší úspora energie použitím pasivního splitter,
- podstatně zlepšuje sdílení vláken (10 krát) mezi CO a koncovými jednotkami,
- splňuje parametry pro nasazení na stávající síť [9].



Obrázek 9: Technologie ODSM

4.3 Stacked XG-PON

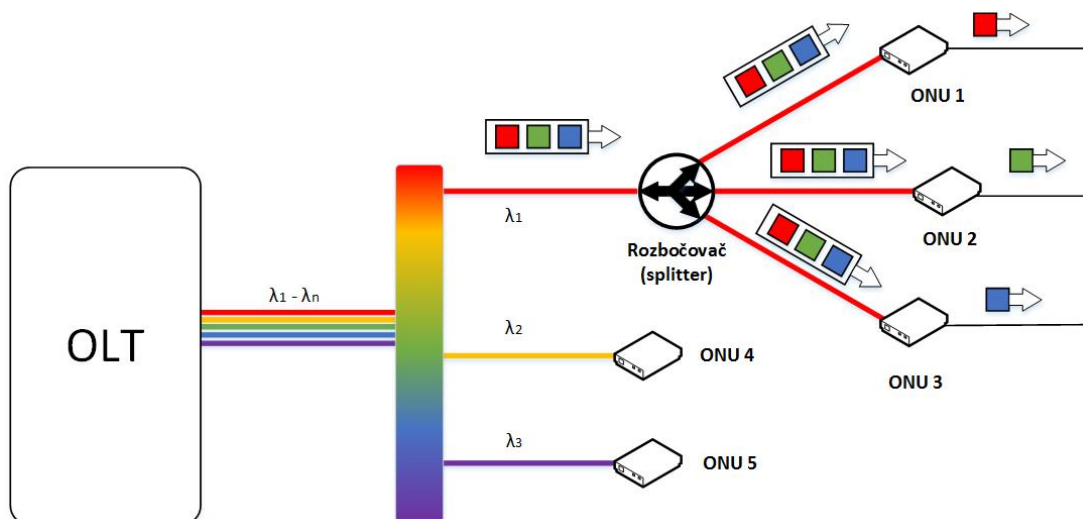
Jedná se o metodu skládání XG-PON1 sítí, které sdílí jednu ODN síť pomocí WDM rozbočovače. Každá XG-PON1 síť využívá pár vlnových délek nezávisle na ostatních. Tyto vlnové délky mohou být přiděleny pevně nebo proměnlivě. Narozdíl od ODSM-PON je potřeba naladitelných ONU jednotek. Technologie Stacked XG-PON je zobrazena na obrázku 10 [9].



Obrázek 10: Stacked XG-PON

4.4 WDM-TDM PON (Hybrid PON)

Jako hybridní pasivní sítě se označují kombinace sdílení přístupu pomocí vlnového dělení a časového dělení. Tyto sítě nesou označení WDM-TDM PON. Tím se dosahuje daleko efektivnějšího využití sítě a do sítě je možno připojit více uživatelů s využitím vyšší přenosové kapacity.

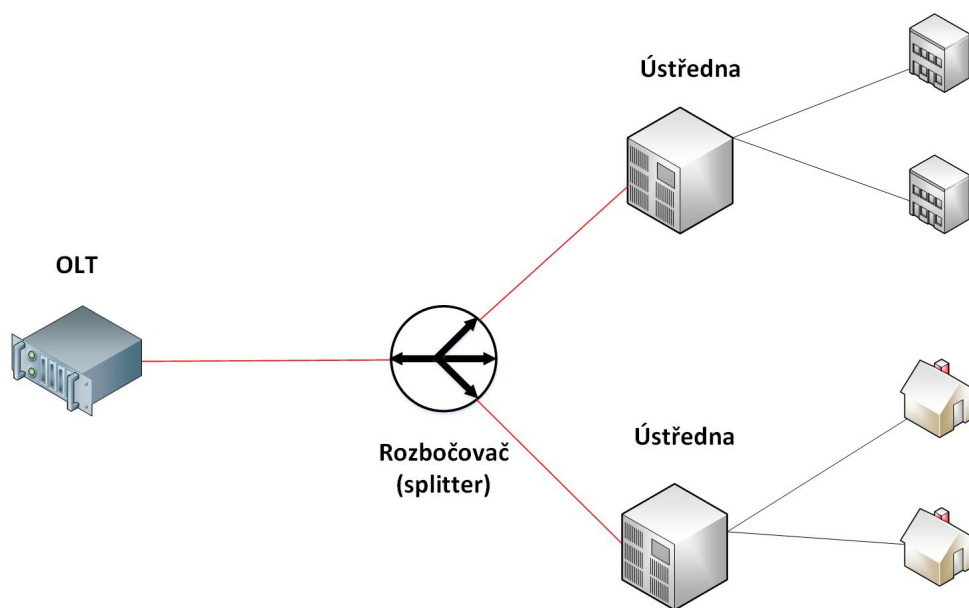


Obrázek 11: WDM-TDM PON

Nejprve se využívá WDM technologie, kdy se z OLT jednotky vysílají všechny vlnové délky po jednom optickém vlákně. Ty jsou rozděleny pomocí AWG směrové odbočnice do jednotlivých podsítí, ve kterých se využívá časový multiplex TDM. Následně signál dorazí do pasivního rozbočovače, kde se signál dělí časově, a veškerá data jsou poslána ke koncovým uživatelům. Data musejí být šifrována, aby nemohla jiná koncová jednotka data přečíst. Proto u koncových jednotek jsou data zahozena, pokud pro ně nejsou určeny.

4.5 xPON/xDSL

V městských a páteřních sítích se využívají xPON technologie, jako například DWDM technologie, které jsou cenově výhodné, jelikož je možné připojit více koncových uživatelů. Hybridní xPON/xDSL sítě využívají metalického vedení i optického vlákna. Vláknem je přivedeno od poskytovatele do ústředny, která se nachází maximálně stovky metrů od koncových uživatelů, kteří se připojí již pomocí kroucené dvojlinky. Jedná se o tzv. FTTx, kde je přivedeno vlákno do ústředny, nebo budovy, kde se nachází koncová jednotka a dále je využito metalického vedení. Typy FTTx jsou popsány v kapitole 2.2. Na obrázku 12 je zobrazena hybridní síť xPON/xDSL.



Obrázek 12: Hybridní síť xPON/xDSL

5 Přehled technologií xDSL

DSL je zkratka pro Digital Subscriber Line (digitální účastnická přípojka) a umožňuje vysoko-rychlostní přenos dat po stávajícím telefonním vedení. Podle vlastností se dané technologie liší a jmenují. Písmeno „x“ na začátku zkratky DSL pak znamená, o jaký typ se jedná. Existuje mnoho různých druhů systémů xDSL jako např. DSL (Digital Subscriber Line), IDSL (Integrated Digital Subscriber Line), HDSL (High-bit-rate Digital Subscriber Line), SDSL (Symmetrical Digital Subscriber Line), SHDSL (Single-pair High-bit-rate Digital Subscriber Line), ADSL (Asymmetrical Digital Subscriber Line) a VDSL (Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line). Pro dosažení vyšší přenosové rychlosti dat je potřeba zvýšit kmitočtové pásmo přenášeného signálu.

DSL je technologie, která přebírá digitální data, které nevyžadují přeměnu na analogovou formu a zpět. Data jsou napřímo přenášena do počítače uživatele jako digitální data. To umožňuje poskytovateli využívat mnohem větší šířku pásma pro přenos dat [11] [12].

Tabulka 2: Přehled přípojek xDSL

Označení	Doporučení ITU-T	Upload [Mbit/s]	Download [Mbit/s]	Linkový kód	Metoda duplexního přenosu	Orientační dosah [km]
IDSL	-	0,128	0,128	2B1Q	EC	7
HDSL	G.991.1	2	2	2B1Q	EC	3
SDSL	-	až 2,3	až 2,3	2B1Q	EC	2 až 5
SHDSL	G.991.2	až 2,3	až 2,3	16-PAM	EC	2 až 7
ADSL	G.991.1	až 1	až 8	DMT	EC, FDD	2 až 5
VDSL asymet	G.991.1	až 6,4	až 52	DMT, QAM	FDD	0,3 až 1,5
VDSL symet.	G.991.1	až 26	až 26	DMT, QAM	FDD	0,3 až 1,5

5.1 Basic Rate ISDN (BRI)

Digitální síť integrovaných služeb (ISDN) je prvním z DSL rodiny. ISDN měla poskytnout globální digitální síť pro integrovaný přenos hlasových a datových signálů. Proto se ISDN zaměřovalo na přenos hlasových signálů a nízko rychlostních datových signálů. BRI je schopen přenášet až rychlostí 160 kbit/s v symetrickém provozu s maximální vzdáleností 5,5 km. S použitím opakovacího je možné uskutečnit provoz i na delší vzdálenosti. BRI se skládá ze dvou "B"kanálů s rychlostí 64 kbit/s a z jednoho "D"kanálu s rychlostí 16 kbit/s. Zbylých 16 kbit/s využívá kontrolní kanál. ISDN využívá linkový kód 2B1Q. Obousměrného provozu ve stejném pásmu je dosaženo pomocí potlačení ozvěny.

Novinkou v ISDN je IDSL (ISDN DSL). Přenos je uskutečňován jako u základní přípojky ISDN. Rozdíl je v přímém připojení na datovou síť. Díky tomu odpadá prodleva při vytváření spojení přes síť ISDN s přepojováním okruhů (B kanály). Pro přenos v základním pásmu se vy-

užívá linkového kódu 2B1Q. Užitečná rychlost v symetrickém provozu je 128 kbit/s a maximální překlenutá vzdálenost může přesáhnout i více než 10 km [12] [13].

5.2 HDSL

HDSL (High-bit rate Digital Subscriber Line) je technologie využíváná pro datové přenosy a podporuje symetrický provoz s přenosovými rychlostmi 1,544 Mbit/s a 2,048 Mbit/s do maximální vzdálenosti 3,6 km (na 0,4 mm metalickém vedení) až 4,2 km (na 0,5 mm metalickém vedení). Použitím opakovacích lze navýšit maximální dosah až na 20 km. Existují dva možné způsoby duplexního symetrického přenosu po metalickém vedení. První způsob je přenos po dvou symetrických párech s přenosovou rychlostí 1168 kbit/s na každém páru. Druhý způsob je přenos po třech symetrických párech s přenosovou rychlostí 784 kbit/s na každém páru. V tabulce 3 je porovnání HDSL na dvou a třech párech vedení. [13] [14].

Tabulka 3: Porovnání HDSL na 2 a 3 párech vedení

Počet vedení (párů)	Celková rychlost [kbit/s]	Rychlost na pár [kbit/s]	Služební kanál
2	2304	1168	16
3	2304	768	16

Jestliže není potřeba používat maximální přenosovou kapacitu, tak lze využít přenos pouze po jednom symetrickém páru. Je potřeba využít metody potlačení ozvěny k oddělení dopředného a zpětného přenosu[15].

5.2.1 HDSL2

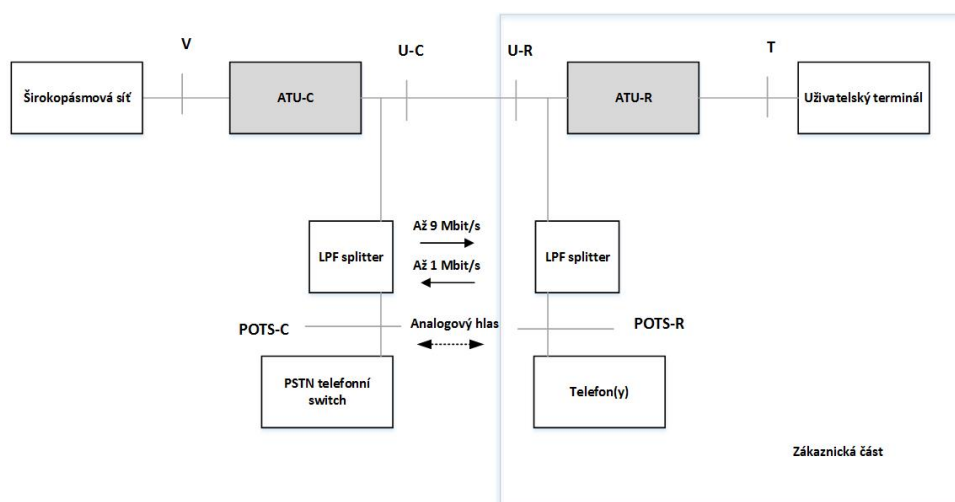
HDSL2 je novější a vylepšenou verzí technologie HDSL. Jeho vývoj začal v roce 1995. Tato technologie dosahuje stejných přenosových rychlostí a překlenutí vzdálenosti při využití pouze jednoho páru drátů. Avšak oproti 2B1Q kódování používá TC-PAM (Trellis Coded-Pulse Amplitude Modulation) [13].

5.3 ADSL

Přípojky ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) také využívají k digitálnímu přenosu vysokými rychlostmi již existujících metalických symetrických párů nasazených v přístupové síti. Avšak využívají širší kmitočtové pásmo, než bylo u těchto sítí původně určeno. ADSL přenáší digitální signály v kmitočtové přeložené pásmo a na rozdíl od HDSL či SHDSL umožňuje zachovat funkci původní telefonní nebo ISDN přípojky.

Jak název napovídá, tak ADSL se vyznačuje nesymetrií přenosových rychlostí. V sestupném směru dosahuje přenosové rychlosti až 8 Mbit/s. Ve vstupném směru dosahuje přenosových rychlostí až 1 Mbit/s [12][13].

Analogový hlas je přenášen v základním pásmu v kombinaci s přenosem dat z propustného pásma přes dolní propust (low-pass filter LPF), také známo jako splitter. Na obrázku 13 je zobrazen referenční model ADSL, kde ATU-R (ADSL Transceiver Unit-Remote terminal) znamená ADSL modem na straně uživatele a ATU-C (ADSL Transceiver Unit-Central office end) znamená ADSL modem na straně poskytovatele služby.



Obrázek 13: Referenční model ADSL

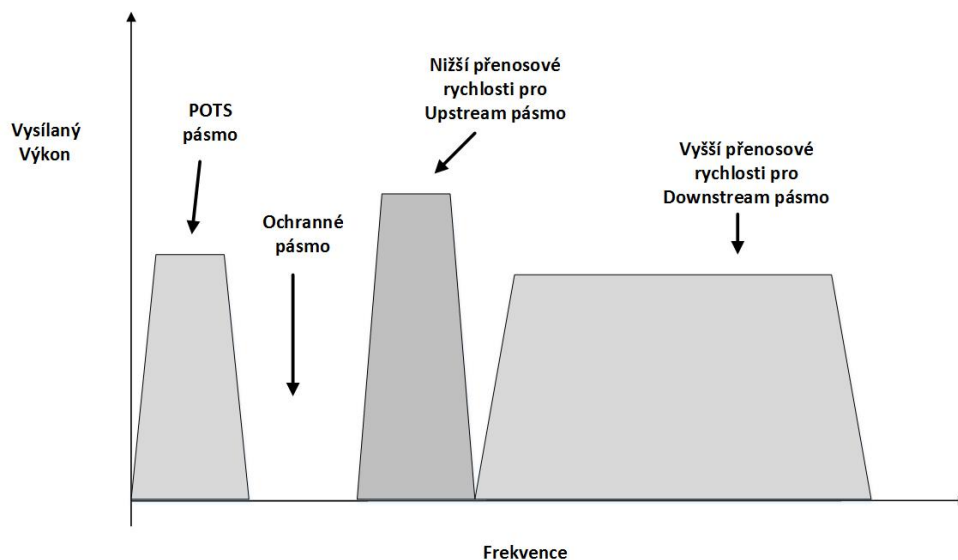
U ADSL probíhá přenos oběma směry po jednom dvoudrátovém symetrickém vedení. Proto je potřeba nějak oddělit přenosové kanály. To je docíleno pomocí frekvenčního dělení FDM (Frequency Division Multiplexing) nebo pomocí metody digitálního potlačení ozvěny EC (Echo Cancellation).

FDM - Frequency Division Multiplexing

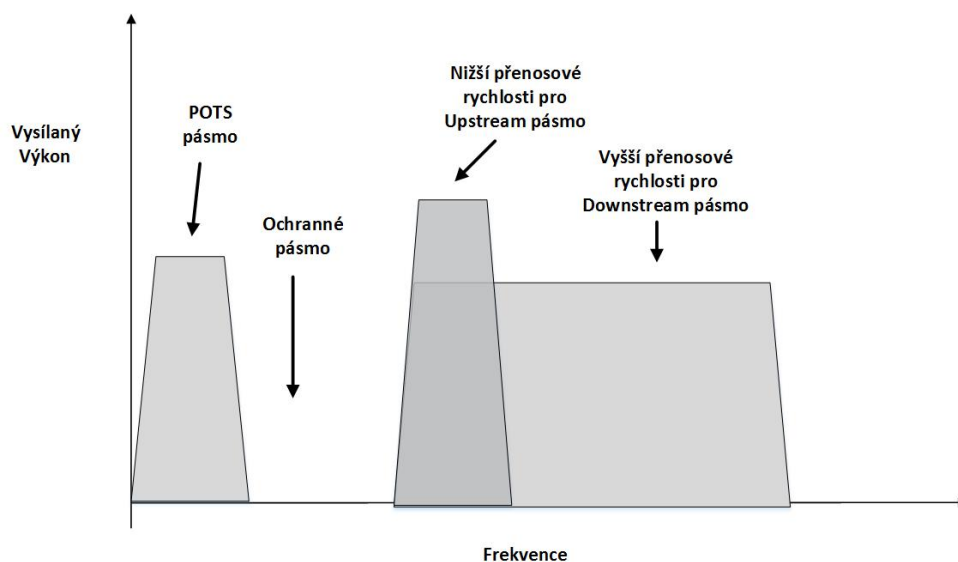
Metoda FDM se využívá ve většině ADSL systémů. Aby se zabránilo přeslechům, tak jsou upstream a downstream od sebe odděleny. Při současném provozu s POTS (Plain Old Telephone Service) je nutné použít ochranné pásmo, které umožňuje oddělení digitálního přenosu od šumu. Výhodami FDM metody jsou jednoduchá implementace, menší nákladovost než u metody EC, avšak nevýhodou je méně efektivní využívání kmitočtového spektra.

EC - Echo Cancellation

Méně používanou metodou je EC metoda, kde frekvenční pásmo upstreamu leží uvnitř frekvenčního pásma downstreamu. Tímto se sníží vysílaná šířka pásma. Pro zabránění vlastních přeslechů mezi kanály se využívá metoda potlačení ozvěny. Na obrázcích 14 a 15 jsou zobrazeny FDM a EC metody dělení přenosového kanálu [16].



Obrázek 14: FDM dělení přenosového kanálu



Obrázek 15: EC dělení přenosového kanálu

5.3.1 ADSL2

ADSL2 je rozšíření ADSL. Využívá stejné přenosové pásmo jako ADSL. Poskytuje vyšší přenosové rychlosti a to 8 Mbit/s pro downstream a 800 kbit/s pro upstream.

5.3.2 ADSL2+

Dalším rozšířením je ADSL2+. Byla navýšena maximální frekvence na 2,208 MHz. Poskytuje přenosovou rychlost až 24 Mbit/s pro downstream a pro upstream přenosové rychlosti přes 1

Mbit/s.

5.4 VDSL

Přípojka VDSL (Very-high-bit-rate digital subscriber line) je rozšířením ADSL technologie. Dosahuje vyšších přenosových rychlostí a může pracovat v symetrickém i v nesymetrickém režimu. V symetrickém provozu je maximální přenosová rychlost 26 Mbit/s. V nesymetrickém provozu dosahuje přenosových rychlostí až 52 Mbit/s ve směru od poskytovatele k účastníkovi a 6,4 Mbit/s ve směru od účastníka k poskytovateli. Vyšších přenosových rychlostí je dosaženo rozšířením kmitočtového pásma až k 30 MHz (za cenu nižšího dosahu a to maximálně do 1,6 km). Přípojka VDSL se využívá v kombinaci s optickou sítí, kdy je ONU jednotka ukončena maximálně kilometr od zákazníka. ONU jednotka je spojena s ústřednou pomocí optického vlákna.

Pro oddělení směrů přenosu se používá metoda frekvenčního dělení FDD (Frequency Division Duplex). I u VDSL probíhá přenos dat po jednom páru vodičů. Používané modulace jsou DMT (Discrete Multi-Tone), CAP (Carrierless Amplitude Phase), nebo modulace DWMT (Discrete wavelet Multi-tone transmission) [11][13].

6 Triple Play služby

Triple play má význam spojení tří služeb. Jedná se o služby přenosu hlasu (VoIP), videa (IPTV) a dat. V této kapitole jsou jednotlivé služby popsány včetně kvality služby QoS.

6.1 Kvalita služby QoS (Quality of Service)

Kvalita služby (QoS) je schopnost sítě poskytnout služby s definovanou kvalitou. Dnešní konvergované sítě jsou založeny na internetovém protokolu (IP). Na IP protokolu je založena také většina současných počítačových aplikací, stejně jako internet. IP sítě jsou flexibilní a efektivní, ale nemají garantovanou záruku minimálního zpoždění, potřebné pro vysoce kvalitní audio a video služby. Jinak řečeno, starší IP sítě mohou pouze nabízet "best-effort" služby. Proto bylo nezbytné aktualizovat IP sítě tak, aby podporovaly QoS.

Stávající síťová technologie zlepšuje tradiční technologii přepínání paketů dvěma možnostmi. První možností je diferenciací provozu, kdy dochází k oddělení hromadného provozu do menších tříd. S těmito třídami se zachází podle konfigurovaných parametrů. Druhou metodou je řízení přetížení (kontrola a vyhýbání). Zatlacení znamená snížení výkonu sítě v důsledku nadměrného zatížení provozu. Efektivní správou síťových prostředků je možné udržet výkon s vyšším zatížením sítě, ale pokaždé dojde k přetížení. Proto se při doručování služeb s QoS musí přetížení řešit [17].

6.1.1 End-to-end výkonové parametry

Při zajišťování QoS je důležité najít sadu parametrů, které dokáží kvantifikovat a porovnávat výkonnost sítě. Některé z parametrů, které mohou být použité jsou end-to-end zpoždění a bitová chybovost (BER - Bit Error Ratio).

IPPM (The Internet Protocol Performance Metrics) je pracovní skupinou IETF, která definuje standardní metriky pro vyhodnocování výkonu sítě. Tyto metriky jsou určené pro dimenzování sítě a konstrukci síťových zařízení i pro QoS. Pro QoS existují nejméně čtyři definované metriky:

- Zpoždění (delay),
- kolísání zpoždění (jitter),
- ztrátovost paketů (packet loss),
- propustnost (bandwidth) [17].

6.1.2 Třídy provozu

Existují přenosové toky s podobnými QoS požadavky. Všechny VoIP toky jsou citlivé na zpoždění a všechny webové transakce jsou citlivé na přenosové chyby a ztráty. Tyto sady mohou být

seskupené do větších celků, takzvaných tříd. Třídy provozu jsou označovány jako CoS (Class of Service). Hlavní paketové síťové technologie (IP, ATM, Frame Relay, MPLS a Ethernet) poskytují hlavičku pro označení dané třídy.

Tabulka 4: QoS požadavky pro různé aplikace [17]

Typ přenosu	Šířka pásma	Ztrátovost paketů (max)	Zpoždění (max)	Jitter (max)
Interaktivní hlas (G.711)	12-106 kbit/s	1%	150 ms	30 ms
Streamované video (MPEG-4)	0.005 - 10 Mbit/s	2%	5000 ms	-
Streamované audio (MP3)	32 - 320 kbit/s	2%	5000 ms	-
Data	Proměnlivé	Citlivé	-	-

6.2 IPTV

Internet Protocol Television (IPTV) neboli televizní vysílání přes vysokorychlostní síť je jednou ze poskytovaných služeb Triple Play. Kromě televizního vysílání může být IPTV prezentováno také jako video na přání (Video on Demand - VoD) či audio obsah (radio).

6.2.1 Architektura IPTV

Architekturu IPTV lze rozdělit do následujících částí:

- Head-end,
- distribuční síť,
- přístupová síť,
- předplatitelská část.

Head-end

Jedná se o místo, které přijímá obsah jako jsou televizní programy či rádiové stanice z různých zdrojů jako je pozemní, satelitní nebo kabelové vysílání. Dochází zde ke kódování, kompresování a multiplexování programů. Následně jsou posílány v IP paketech s využitím nejvhodnějších fyzických rozhraní. Video a audio obsah je komprimován MPEG kodekem, který definuje parametry, jako jsou pixely na řádek, obnovování rámců. Poté jsou vysílány prostřednictvím IP sítě v multicastovém nebo v unicastovém adresovacím režimu[17].

Distribuční síť

Distribuční síť musí odesílat audiovizuální signály přes regionální a metropolitní sítě, dokud nedorazí k cílovému zákazníkovi. Vysokokapacitní jádro pomocí protokoly RTP či RTSP musí

zaručit, že u každého paketu, ať už unicastový nebo multicástový, nedojde ke degradaci kvality parametrů jako zpoždění a ztrátovosti. IP multicast je metoda, při které mohou být informace zaslány více uživatelům ve stejnou chvíli.

Distribuční sítě jsou IP orientované a založené na přenosu po Ethernetu. V distribučních sítích se nejčastěji využívá technologie MPLS (Multiprotocol Label Switching). MPLS je metoda přepínání paketů po definované cestě na základě navěští [17].

Přístupová síť

Přístupová síť pokrývá první míli a její úlohou je přenos dat ke koncovým uživatelům. K dispozici je několik technologií a to včetně ADSL2, ADSL2+, VDSL2, FTTN, FTTH a WiMAX. Při výběru záleží na parametrech jako je potřebná šířka pásma, vzdálenost a finanční možnosti. Funkce přepínání je požadavek na síť, kdy uživatel sdělí pomocí IGMP (Internet Group Membership Protocol), který program chce sledovat. Z technického hlediska to znamená, že uživatel se stane součástí multicastové skupiny, která obsahuje vybraný program [17].

Předplatitelská část

IP pakety se dostanou na straně uživatele k přijímači jako video stream. Pro přehrávání IPTV je potřeba počítače, set-top-boxu (STB) připojeného k TV nebo jiné aplikace pro příjem na chytrých telefonech. Interakce mezi uživatelem a sítí je zajištěna pomocí protokolu IGMP pro volbu kanálu v případě IPTV a RTSP protokolu v případě VoD aplikací [17].

6.2.2 IPTV služby

EPG (Electronic Programming Guide)

Jedná se o tzv. programového průvodce, který umožňuje divákům na obrazovce zobrazit TV program nebo právě vysílaný pořad. Tato služba umožňuje zobrazit detailní popis jednotlivých televizních pořadů a také nabízí vyhledávání programů s využitím různých filtrů (vyhledávání podle klíčového slova, žánru nebo roku vydání). Architektura EPG je na principu klient-server. Klientská část se nachází v IP set-top-boxu a server se nachází na straně datového centra IPTV [21].

VoD (Video on Demand)

VoD neboli video na vyžádání je zcela odlišný od IPTV, neboť umožňuje uživatelům vybrat a sledovat různé filmy, které jsou nabízeny za poplatek. VoD systémy mají dvě důležité vlastnosti:

- Umožňuje uživatelům zvolit video z digitální knihovny, které chce uživatel sledovat. Zároveň umožňuje uživatelům zvolit čas, odkdy chce začít video sledovat.
- Poskytuje typické DVD funkce jako je pauza, přetáčení dopředu a dozadu.

VoD servery mohou pracovat dvěma způsoby a to jako streamovací služba nebo stahovací služba. Streamování probíhá v reálném čase a video je ze serveru stahováno přímo do TV. Proto

je potřeba velké šířky pásma a požadavky na QoS stejně jako u IPTV. U stahování je nejdříve video staženo a uloženo na síťový disk, PC nebo na set-top-box a poté je možné sledovat.

VoD je jednou z nejvýznamnější aplikací, které dělají IPTV více atraktivní. Jelikož kabelové a satelitní přenosy nedokážou takové služby nabídnout [17] [21].

PVR (Personal Video Recording)

PVR neboli osobní záznam videa je služba, která poskytuje uživatelům větší flexibilitu při sledování televize. Každý předplatitel má vlastní úložný disk pro nahrávání programů, které si může přehrát kdykoliv se mu to hodí. Obdobně jako při využívání funkcí videorekordéru.

U živého vysílání programu mohou uživatelé pozastavit program, přeskočit reklamy nebo se pak vrátit k živému sledování programu. PVR služba také zahrnuje síťový osobní záznam videa (NPVR - Network PVR), klientův osobní video záznam (CPVR - Client PVR), funkce časového posunu TV a zobrazení programů z minulého týdne [17].

6.2.3 Audio a video kodeky

Existuje celá řada specifikací kodeků (kodér-dekodér) pro audiovizuální signály, které definují kódování, kompresi a streamování audiovizuálního obsahu. Tyto standardy usnadňují nezávislou implementaci kodérů a dekodérů. Nejoblíbenějším standardem je MPEG (Moving Pictures Expert Group), definovaný ISO/IEC a ITU-T. Dalším zajímavým kodekem je například Windows Media (vyvíjen Microsoftem), který bývá zvažován mnoha novými vstupujícími účastníky na trhu IPTV [17].

MPEG-1

MPEG-1 (ITU-T H.261) byl prvním kodekem digitálního videa a byl zveřejněn v roce 1993. Tento standard umožnil vývoj z analogové na digitální dimenzi bez ohledu na analogové standardy. Komprimace a kódování zvuku a pohybu je při rychlosti okolo 1,5 Mbit/s. Tím je poskytnuto rozlišení videa jako je u videokazet VHS. Cíl bylo se zaměřit na audio a video CD-ROM aplikace. MP3, audio část MPEG-1, se stal populárním díky Internetu a digitálnímu rádiu [17].

MPEG-2

MPEG-2 (ITU-T H.262) byl zveřejněn v roce 1995. Jedná se o rozšíření MPEG-1 a poskytuje širší rozsah přenosových rychlostí od 2 do 20 Mbit/s. Dále poskytuje několik úrovní kvality a několik rozlišení obrazovky. MPEG-2 aplikace byly velmi populární v polovině 90. let a jsou používány v satelitech, v kabelech, DBS, DVD a v prvních implementacích IPTV [17].

MPEG-4

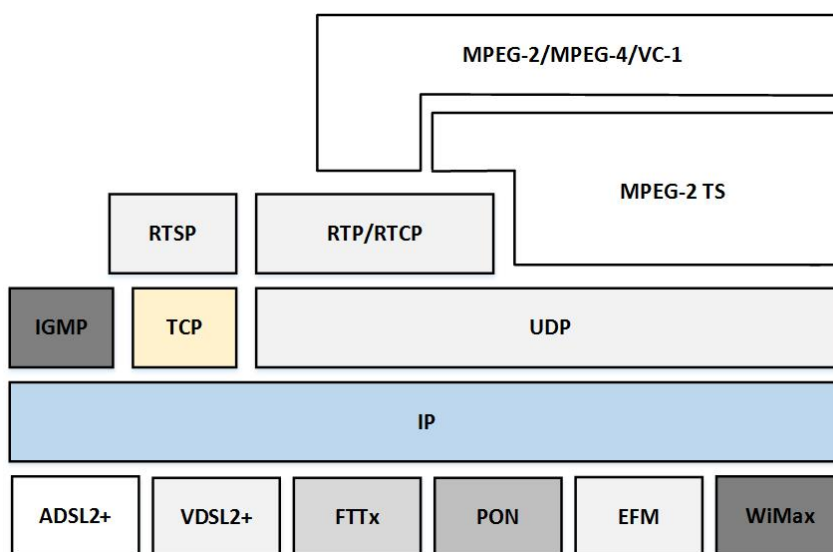
MPEG-4 part 10 (ITU-T AVC/H.264) byl zveřejněn v roce 1999. Je velmi flexibilním kodekem, který poskytuje přenosovou rychlost od 5 kbit/s do 10 Mbit/s, takže je vhodný pro mobilní video, pro standardní rozlišení i pro vysoké rozlišení TV. MPEG-4 umožňuje ušetřit až 50 procent šířky pásma, proto je volbou pro nové poskytovatele IPTV, zatímco stávající MPEG-2 aplikace se pomalu přesouvají na MPEG-4 [17].

SMPTE VC-1

SMPTE VC-1 (WM9V) je specifikace video kodeku, který byl standardizován SMPTE (Society of Motion Picture and Television Engineers) a byl implementován od Windows Media 9 (WM-9). Má podobné rysy jako MPEG-4, ale pravděpodobně poskytne lepší integraci s PC nebo s hybridními PC-TV zařízeními [17].

6.2.4 Používané protokoly

Podpora více datových a multimediálních aplikací přes společnou infrastrukturu je pravděpodobně největším úspěchem konvergovaných sítí. Protokoly určené pro specifické aplikace se objevují až nad třetí nebo čtvrtou vrstvou. To je případ IGMP či RTSP protokolu. Na obrázku 16 jsou zobrazeny používané protokoly pro audiovizuální služby v konvergovaných sítích [17].



Obrázek 16: Používané protokoly pro audiovizuální služby v konvergovaných sítích

TCP protokol

TCP (Transmission Control Protocol) je nejpoužívanějším protokolem transportní vrstvy. Tento protokol je spolehlivě orientovaný a při přenosu dat využívá oboustranné spojení mezi komunikujícími stanicemi [18].

UDP protokol

UDP (User Datagram Protocol) je uživatelský datagramový protokol, který zajišťuje přenos datagramů mezi počítači v síti. Jedná se o nespolehlivý protokol, jelikož zde není záruka, že se přenášený paket neztratí, nezmění se pořadí paketů nebo, že se některý z paketů nedoručí vícekrát. UDP zajišťuje jednodušší zpracování, a proto je rychlejší a efektivnější. Využívá se u real-time aplikací, které nevyžadují spolehlivý přenos a nepožadují automatické odeslání poškozených nebo ztracených paketů. V takovémto případě si o jejich doručení požádají samy [18].

RTP a RTCP protokol

RTP (Real-time Transport Protocol) je definovaný IETF (Internet Engineering Task Force). Jedná se o protokol komunikace v reálném čase a zabezpečuje přenos interaktivních dat v reálném čase. Typicky se využívá pro přenos digitálního audia, videa a simulace dat přes multicastové nebo unicastové síťové služby. Protokol RTP se často využívá s protokolem RTCP (Real-time Control Protocol), který umožňuje synchronizaci vícenásobných datových proudů a sledování statistik přenosu dat. RTCP používá lichá čísla portů a RTP využívá sudá čísla portů. Většinou RTCP port bývá o jedno číslo vyšší než port RTP [19].

IGMP

IGMP (Internet Group Membership Protocol) je síťový protokol, který umožňuje uživatelům se připojit nebo odpojit z multicastové skupiny. Proto musí všichni uživatelé mít tento protokol implementován, pokud chtějí dostávat multicastové informace. Pokud chce libovolný uživatel, který je připojený k lokální síti, stát členem multicastové skupiny, tak pošle IGMP zprávu lokálnímu multicastovému routeru. Tento router přijme požadavek od uživatele a poté upraví směrovací tabulku. Router pomocí zpráv membership query message ověřuje své multicastové skupiny, zda jeho členové mají stále zájem být členy těchto skupin. Pokud je nějaká multicastová skupina prázdná, tedy není v ní žádný připojený host, tak je tato skupina smazána ze směrovací tabulky. V současné době se používají 3 různé verze IGMP, a to IGMP version 1 (IGMP v1), IGMP version 2 (IGMP v2) a IGMP version 3 (IGMP v3) [17] [20].

6.2.5 Subjektivní metody měření kvality IPTV

Subjektivní metody měření kvality IPTV využívá skupina uživatelů, kteří chtějí posoudit kvalitu obrazu. Jsou založené na pocitu skupiny pozorovatelů, který na nich zanechá testovaný videozáznam. Výhodou subjektivní metody je popsání technické kvality videozáznamu, tak jak

je vnímána člověkem. Díky tomu lze omezit informace, které nejsou postřehnutelné lidskými smysly. Typické kroky pro subjektivní měření kvality IPTV služeb jsou: [22]

- Vybrat vzorek videa pro testování,
- vybrat několik konfiguračních parametrů,
- nastavit testované prostředí, které splňuje požadované konfigurační parametry,
- shromáždit skupinu lidí pro provedení testu
- provést test a analýza výsledků.

Mezi subjektivní metody měření kvality IPTV patří například MOS, DSCQS a ACR.

Stupnice MOS (Mean Opinion Score)

MOS systém testování byl definován ITU a probíhá v několika krocích. Nejdřív se sestaví série krátkých videí, které jsou určené pro test. Poté se vybere sestava parametrů, které budou předmětem pro hodnocení vzorku vybranou skupinou lidí (min. 18). Po vybrání správné skupiny lidí a vhodného prostředí pro test je spuštěno samotné testování. Poté tato skupina lidí ohodnotí číslem dojem z videa podle stupnice hodnocení v tabulce 5. Výsledná hodnota MOS je složena z průměru naměřených výsledků [22].

Tabulka 5: MOS (Mean Opinion Score)

MOS	Kvalita	Znehodnocení
1	výborná	nepostřehnutelné
2	dobrá	postřehnutelné, ale neobtěžující
3	slušná	mírně obtěžující
4	špatná	obtěžující
5	nevhodná	velmi obtěžující

Stupnice DSCQS (Double Stimulus Continuous Quality Scale)

DSCQS je subjektivní metoda hodnocení dvojice videí (referenční a testované). Hodnocení probíhá při krátkém zobrazení (8-10 sekund) obou videí v náhodném pořadí. Tím je docíleno, že pozorovatel neví, které video je referenční, a které video je testované. Kvalita videa je hodnocena podle stupnice v rozsahu od 0 do 100. Tato stupnice by měla být vybavena slovy označující kvalitu (výborná, velmi dobrá, ještě dobrá, špatná a velmi špatná). K testování metodou DSCQS je potřeba aspoň 15 lidí různých věkových a profesních skupin a s dobrým stavem zraku [22].

ACR (Absolute Category Rating)

ACR je metodou hodnocení kvality obrazu nebo videa, kdy pozorovatel sleduje video 10 sekund a poté má dalších 10 sekund na ohodnocení videa. Pozorovatelé hodnotí video na škále

od 1 do 5, stejně jako v případě MOS metody. Výsledkem je hodnota MOS, která je dána průměrem hodnot získaných od pozorovatelů.

6.2.6 Objektivní metody měření kvality IPTV

Tyto metody využívají k určení kvality obrazu/video především matematických výpočtů. Testuje se kvalita videosignálu na základě porovnávání obrazových snímků s komprimovanou verzí a degradovanou kvalitou signálu. Objektivní metody jsou jednodušší, rychlejší a levnější než metody subjektivní. Mezi objektivní metody patří MSE, PSNR, MDI MPQM, SSIM a další [22].

MSE (Mean Square Error)

MSE parametr reprezentuje střední kvadratickou odchylku přijatého videa od původního videa. Výpočet je dán vzorcem:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{j=0}^{M-1} \sum_{i=0}^{N-1} (x_{ij} - y_{ij})^2 \quad (1)$$

x je originální obraz, y je přijatý obraz, i a j jsou prvky obrazové matice, M je počet pixelů na šířku a N je počet pixelů na výšku [22].

PSNR (Peak Signal to Noise Ratio)

PSNR parametr představuje poměr mezi nejvyšší hodnotou signálu vůči parametru MSE a udává se v dB. Je dán vzorcem:

$$PSNR = 10 \times \log \frac{m^2}{MSE} \quad (2)$$

m udává maximální hodnotu pixelu [22].

SSIM (Structural similarity index)

SSIM je novější metodou, která zohledňuje lidský vizuální systém. A to zjištěním podobností mezi dvěma obrázky. Pomocí toho docíleno zlepšení tradičních metrik (MSE a PSNR), které občas bývají v rozporu s lidským vnímáním. SSIM má referenční hodnoty v intervalu od 0 do 1, kde 0 znamená nulový vztah k originálnímu obrázku. Hodnoty 1 je docíleno při shodě porovnávání obrazců. SSIM je dán vztahem:

$$SSIM(x, y) = [l(x, y)]^\alpha [c(x, y)]^\beta [s(x, y)]^\gamma \quad (3)$$

kde: $l(x, y)$ porovnává jas signálu, $c(x, y)$ porovnává kontrast signálu a $s(x, y)$ měří strukturální korelaci.

$$l(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \quad (4)$$

$$c(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2\sigma_y^2 + C_2} \quad (5)$$

$$s(x, y) = \frac{2\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \quad (6)$$

kde: μ_x a μ_y znamenají průměr ze vzorků x a y , σ_x a σ_y znamenají rozptyl ze vzorků x a y [22].

6.3 VoIP

VoIP je zkratka pro volání přes internet (Voice over Internet Protocol). Jedná se o nový způsob, jak poskytnout službu, která je stará více jak sto let. Z tohoto hlediska, IP telefonie nepřináší nic nového pro uživatele. Nicméně, IP telefonie může potenciálně přinést výhody pro uživatele i poskytovatele služeb. Uživatelé mohou těžit z nižších cen hovorů, protože se operátoři vyhnou placení spojovacích poplatků.

IP telefonie dává novým poskytovatelům služeb konkurenční výhodu oproti stávajícím operátorům, protože poskytuje více možností pro instalaci jejich služeb. Navíc uživatelé těží z rostoucí konkurence poskytovatelů služeb. IP telefonie má schopnost integrovat hlas i data do stejné síťové infrastruktury. Díky tomu je snadná a levná instalace i správa této služby. Pro poskytovatele služeb je přijatelné, že se sníží výdělky, ale proti tomu IP telefonie nabízí spoustu nových možností prostřednictvím nové třídy služeb, která vylepšuje klasickou telefonii o videohovory, integraci mobilních a pevných linek.

Z technického hlediska je hlavní výhodou IP telefonie to, že umožňuje konvergenci dat a hlasu. Ale konvergence není možná bez IP sítí s QoS. V posledních několika letech bylo vyvinuto velké úsilí na návrh architektury takových sítí.

Vzhledem k současnému stavu techniky IP technologie není integrace časově citlivého provozu do Internetových páteří moc dobrý nápad, pokud poskytovatel nabízí VoIP se srovnatelnou kvalitou veřejné telefonní sítě (PSTN). Někteří operátoři zvolili variantu čisté IP sítě jen pro přenos hlasu. Pro tyto operátory je integrace hlasu a dat až druhým cílem, až bude síť připravena na řešení problémů při přenosu různých tříd provozu.

Integrované a jednoúčelové VoIP sítě trpí s QoS problémy, které nebyly přítomny v klasické telefonii. Vzhledem k efektům, které jsou způsobené čekáním ve frontě, je zpoždění v IP sítích větší a méně předvídatelné než v deterministických TDM sítích. Pro korigaci efektů proměnlivého zpoždění musí být část provozu pozdržena ve vyrovnávací paměti (buffer) přijímače a poté je odeslána do dekodéru. Ve skutečnosti se jedná o filtr, který snižuje kolísání velikosti zpoždění paketů (jitter), kdy během hovoru se nesmí nikdy úplně naplnit ani vyprázdnit. Jinak by došlo ke ztrátě dat, nebo by byl dekodér bez zvukových vzorků. Potřeba tohoto filtru zvyšuje celkové zpoždění hlasových vzorků. Při použití větších vyrovnávacích pamětí dochází k navýšení zpoždění. Proto je pro IP telefonii důležitý kompromis mezi hodnotami zpoždění a jitteru na VoIP

přijímači. Pro neinteraktivní aplikace (např. IP rádio) není potřeba kompromisů a buffery pro snížení jitteru mohou být větší, aniž by zanechal znatelný vliv na koncového uživatele. [17]

6.3.1 Kodeky hlasového signálu

G.711

Jedná se o kodek, který specifikuje PCM kódování (Pulse Code Modulation). PCM je vlnová kódovací technika, která přiřazuje každý vzorek ze signálu k číslu, které je reprezentován jako binární slovo. Tento kodek využívá vzorkovací frekvenci 8 kHz a kvantování vzorků na 8 bitů. To dává přenosovou rychlost 64 kbit/s, která je základem pro všechny TDM multiplexovací hierarchie a trvání běžného TDM rámce je 125 μ s. Hlasový signál se kóduje pomocí kódovací metody μ law ve Spojených státech a v Japonsku a pomocí kódovací metody alaw ve zbytku světa [17].

G.723.1

Kodek G.723.1 se vyznačuje nízkým bitovým tokem. V tomto kodeku jsou definovány algoritmy MPC-MLG (Multi-Pulse Maximum Likelihood Quantization), který má bitový tok 5,3 kbit/s. Další definovaný algoritmus je ACELP (Algebraic-Code Excited Linera Prediction), který má bitový tok 5,3 kbit/s.

G.726

Tento kodek patří mezi původní kompresní kodeky. Jedná se o ADPCM (Adaptive Differential Pulse Code Modulation) kódování, které se vyvinulo z DPCM (Differential Pulse Code Modulation) kódování. Kodek G.726 kóduje hlasový signál od 16 do 40 kbit/s. Poskytuje skoro stejnou kvalitu jako G.711, ale pouze s poloviční šířkou pásma a to z důvodu, že posílá pouze informaci o popisu rozdílu mezi předchozím a současným vzorkem [17].

G.729

Jedná se o kodek, který využívá CS-CELP (Code-Excited Linear Predictive) kódování. Algoritmus CS-CELP pracuje s bloky, které se skládají z 80 vzorků a vzorkuje tyto bloky s frekvencí 8 kHz. Z těchto bloků kodek vypočítá optimální koeficienty filtru a parametry zesílení a poskládá 80 bitové rámce, které jsou odeslány do cíle. Tím vzniká přenosová rychlost 8 kbit/s. Kódovací zpoždění G.729 kodeku je 15 ms [17].

6.3.2 Subjektivní metody měření kvality

Kvalita degradovaných hlasových vzorků se vyhodnocuje statisticky a to pomocí větší skupiny lidí. Tato skupina lidí odpovídá na dotazník z doporučení ITU-T P.82 a vyjádří názor k danému hlasovému vzorku. Toto měření je časově i finančně náročné. Výsledná hodnota je skutečnou hodnotou kvality přenosu hlasu MOS-LQS (Mean Opinion Score - Listening Quality Subjective). Při nahrávání vzorku musí být splněny požadavky podle ITU-T Rec. P.800. Mezi tyto požá-

davky patří: specifická nahrávací místnost, kvalitní nahrávací zařízení, vzdálenost hovořícího od mikrofonu, hladina šumu při nahrávání, jednoduché věty a plynulost hovořícího a další. I při hodnocení vzorku musí být splněné požadavky jako: specifická místnost pro poslech (měla by mít stejné vlastnosti jako nahrávací místnost), kvalitní reproduktory, posluchači nedělali tento test více jako 6 měsíců a další [23].

6.3.3 Objektivní metody měření kvality

Vyhodnocení MOS je složité, časově náročné a nákladné. Proto se v praxi přímé vyhodnocení MOS nahrazuje odhady, které provádějí stroje nebo algoritmy. Algoritmické metody hodnocení by měly být objektivní, protože nespolehají na názory lidí, ale mnoho z nich se snaží odhadnout MOS parametr, který je získán z průměru jednotlivých testů (názorů).

V závislosti na vstupních datech, jsou objektivní algoritmy, hodnotící kvalitu, rozděleny do následujících skupin:

- Názorové modely - tyto modely mají na vstupu různé faktory a to včetně zpoždění a dalších síťových výkonnostních parametrů. Výsledkem je odhad konverzačního MOS. Nejvýznamnějším a nejrozšířenějším názorovým modelem je E-model.
- Modely na řečové vrstvě - tyto modely na vstupu vyžadují řečové signály. Výsledkem je vygenerovaný odhad poslechu MOS.
- Modely na paketové vrstvě - v tomto případě jsou na vstupu IP pakety a na výstupu je opět odhad poslechu MOS. Tyto modely jsou vhodné pro monitorování kvality řeči v mezilehlých bodech sítě, kde nejsou řečové signály dostupné [17].

E-model

Jedná se o výpočtový model, který používá přenosové parametry k předpovězení subjektivní kvality hlasu. Tento model byl navržen v 90. letech a byl standardizován v doporučení ITU-T G.107. Tento standard byl také přijat Evropským institutem pro telekomunikační normy (ETSI - European Telecommunications Standards Institute) a Asociací průmyslu telekomunikací (TIA - Telecommunications Industry Association).

E-model poskytuje výsledek je ve formě R-faktoru. Ten hodnotí kvalitu hovoru na škále od 0 (špatný) do 100 (vynikající). Teoreticky mohou být hodnoty R-faktoru převedeny na stupnici MOS, zobrazeno na obrázku 17.

R	Spokojenost uživatelů	MOS	
100	Velmi spokojeni	4,5	Vhodné
94		4,4	
90		4,3	
	Spokojeni		
80	Někteří uživatelé nespokojeni	4,0	Přijatelné
70		3,6	
60	Více uživatelů nespokojeno	3,1	Nepřijatelné
50	Skoro všichni uživatelé nespokojeni	2,6	
0	Nedoporučeno	1	

Obrázek 17: Vztah mezi R-faktorem a stupnicí MOS

Základní předpoklad E-modelu je, že účinky jednotlivých degradací mohou být sečteny. R-faktor se vypočte následujícím způsobem:

$$R = R_0 - I_s - I_d - I_e + A \quad (7)$$

- R_0 – odstup signálu od šumu
- I_s – zhoršení způsobené lineárním zkreslením,
- I_d – zhoršení způsobené zpožděním
- I_e – zhoršení způsobené zkreslením hlasu
- A – faktor očekávání, který zohledňuje ochotu účastníků přijmout nevyhovující výkony u nové služby [17] [24].

PSQM

PSQM (Perceptual Speech Quality Measuer) je algoritmus na výpočet kvality přenosu signálu na základě modelu lidského vnímání. Myšlenkou tohoto modelu je měření degradace kvůli zkreslení v psychoakustické doméně, než měření v obvyklých konvenčních časových a frekvenčních oblastí. PSQM porovnává degradovaný signál s původním. To znamená, že PSQM vždy testuje s referencí. Ve výsledku algoritmus udává odhad MOS, který se někdy označuje jako objektivní MOS (OMOS), protože je vypočítán algoritmem místo z průměru subjektivního

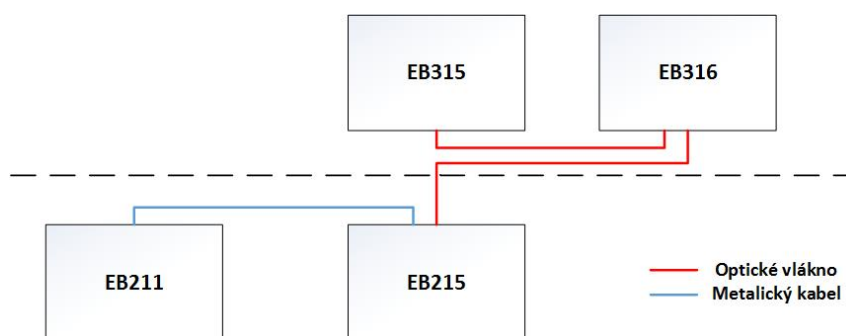
hodnocení[17][23].

PESQ

PESQ (Perceptual Estimation of Speech Quality) byl vytvořený s nástupem VoIP ITU jako standard ITU-T Rec. P.862. Jedná se o standard s požadavky na nová rušení signálu v moderních telekomunikačních sítích. Měřicí algoritmus se musel v těchto sítích vypořádat s vyšším rušením, než je u kodeků v GSM, ale musel se vypořádat také s tím, že zpoždění mezi referenčním a testovaným vzorkem není vždy konstantní. PESQ kombinuje vynikající psychoakustický a kognitivní model PSQM+ (rozšíření PSQM) s algoritmem časového zarovnání. jedním z nedostatků PESQ je ten, že není použitelná pro aplikace, které pracují v reálném čase. [23]

7 Infrastruktura sítě

Tato kapitola i další jsou zaměřeny na praktickou část diplomové práce. Praktické měření bylo realizováno na budově FEI Vysoké školy báňské a to konkrétně na učebnách EB211, EB215, EB315 a EB316. Na učebně EB316 se nachází server Abacus a switch ZyXEL XGS-4528F. Na učebně EB315 se nachází optická trasa. Na EB211 se nachází simulátor vedení Spirent DLS-6900 a na učebně EB215 se nachází ADSL2+ DSLAM ZyXEL IES-1000, VDSL2 DSLAM Zyxel IES-5005, Switch ZyXEL GS-1524 a čtyřkanálové CWDM multiplexory. Tyto učebny jsou mezi sebou propojeny, viz obrázek 18.



Obrázek 18: Blokové schéma propojení laboratoří

7.1 Síťové komponenty

7.1.1 Switch ZyXEL XGS-4528F

Jedná se o L3 switch s duálními porty a umožňuje převod metalického vedení na optické. Podporuje přenosové rychlosti 100/1000 Mbit/s a 10 Gbit/s. Tento switch nabízí 20 portů 1000BaseT a 4 Gigabitové duální porty [25].

Konfigurace

Jelikož se jedná o L3 switch, byl na něm nastaven DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) server. Konfigurace byla provedena přes grafické rozhraní pomocí IP adresy 192.168.1.1. Přihlašovací údaje:

- Uživatelské jméno: admin
- Heslo: 1234

DHCP rozdává IP adresy z IP Poolu (rozsah IP adres), který je nastaven. Pro konektivitu se zařízením DSLAM musela být nastavena adresa v rozsahu 10.0.0.0 až 10.255.255.255. Při zadání jiné adresy nebylo možné komunikace mezi serverem a modemy na straně uživatele.

Dále bylo potřeba aktivovat IGMP protokol, který je nutný pro správnou funkci multicastu u IPTV.

7.1.2 Switch ZyXEL GS-1524

ZyXEL GS-1524 je 24 portový switch (4 Gigabitové duální porty). Jeho hlavní výhodou je jednoduchá konfigurace přes webové rozhraní. GS-1524 disponuje funkcí pro automatickou ochranu proti útokům, např. DOS útoky. Tento switch byl použit jen pro převod optického vedení na metalické [25].

7.1.3 SFP XtendLan XL-MGB-L80C55/ XL-MGB-L80C57XL-MGB-L80C59/ XL-MGB-L80C61

Jedná se o gigabitové CWDM moduly miniGBIC rozměru SFP (Small-Form-Pluggable).

Parametry používaných SFP modulů:

- 1550/1570
- Optický výkon: Tx = +4 dBm
- Citlivost fotodetektoru: -24dBm @1,25 Gbit/s
- Pracovní vlnová délka přijímače: 1100-1600 nm
- Spolehlivý dosah pro vzdálenost až 80 km [26].

7.1.4 ZyXEL IES-1000

Jedná se o ADSL2+ DSLAM, který je založený na IP protokolu. Obsahuje dva sloty pro různé kombinace DSL a VoIP linkových karet, aby mohl zákazníkům poskytovat ADSL2+ a VoIP služby. DSLAM má modul, který umožňuje připojit k internetu až 12 uživatelů. Tento modul podporuje přenosovou rychlost od 128 kbit/s do 24 Mbit/s s maximální vzdáleností 6 km.

DSLAM se chová jako switch, a proto není problém s jeho konfigurací. Podmínkou je, že připojené zařízení musí být v síti 10.0.0/8, na které pracuje DSLAM. Jednotlivé profily již byly vytvořeny dříve, a proto nebyla nutná konfigurace z mé strany. [25]

7.1.5 ZyXEL IES-5005

Jedná se o platformu, která obsahuje pět slotů. První slot je určen pro správu a ostatní sloty jsou pro karty ukončující linky. V našem případě je IES-5005 vybavena kartami MSC1000G a VLC1224G-41.

Karta VLC1224G-41 je VDSL2 linkovou kartou, který obsahuje 24 portů s maximální přenosovou rychlostí 65 Mbit/s pro downstream a 35 Mbit/s pro upstream.[25]

7.1.6 ZyXEL Prestige 660RU-T3 ADSL2+ modem

Jedná se o ADSL modem, který podporuje standardy ADSL, ADSL2 a ADSL2+. Maximální přenosová rychlost pro downstream je 24 Mbit/s. Na modemu je jeden ADSL port pro typy konektoru RJ-11 a RJ-45. Dále je zde port pro RJ-45 konekter, který se využívá jako LAN rozhraní. [25]

7.1.7 ZyXEL P-870MH

Jedná se o VDSL2 modem. Je vybaven čtyřmi LAN porty pro RJ-45 konektory a jedním portem WAN pro RJ-11 konektor. Podporuje přenosové rychlosti do 65 Mbit/s u downstreamu a do 35 Mbit/s u upstreamu. [25]

7.1.8 Spirent DLS-6900

DLS-6900 je simulátor vedení. Umí simulovat modely kabelu PE04 a 26AWG. U typu kabelu PE04 dokáže simulovat do vzdálenosti 7 km s krokem 100 m. Nabízí šířku pásma do 30 MHz. Proto je výhodný pro testování VDSL, VDSL2, ADSL, ADSL2+ a SHDSL. Tento simulátor vedení obsahuje i interní šumový generátor, který umožňuje simulovanou linku zarušit bílým šumem o úrovních -90 dBm/Hz až -140 dBm/Hz. Ovládání přístroje je snadné, veškeré ovládací prvky jsou na čelní straně zařízení.[28]

7.1.9 Server ABACUS

Jedná se o server, který je tvořen čtyřmi síťovými kartami s maximální přenosovou rychlostí 100 Mbps.

Přístup na server je zajištěn pomocí softwaru VMware VSphere Client, který musí být nainstalovaný na PC připojenému k tomuto serveru. Tento PC se musí nacházet ve stejné síti. IP adresa serveru je 158.196.81.21, přihlašovací údaje jsou:

- IP adresa serveru: 158.196.81.21
- Uživatelské jméno: root
- Heslo: n311kat440

Na serveru jsou tři virtuální stroje a to: IPTV server, VoIP server a Data server. Na všechny servery se lze přihlásit pomocí stejného přihlašovacího údaje s heslem n311kat440.

Konfigurace služby IPTV

Pro streamování videa byl využit program VLC. Jedná se o multimediální přehrávač, který umožňuje přehrávání obsahu ve formě zvuku nebo videa. Program VLC je volně stažitelný na stránkách <http://videolan.org/vlc/>.

Na straně serveru ve VLC zvolíme možnost *Médium/Otevřít síťový proud* a v okně Soubor pomocí tlačítka *Přidat* zvolíme videa, které chceme použít pro streamování. Poté stiskneme tlačítko *Proud*. V dalším okně zvolíme *Následující*. Otevře se další okno, kde vybereme metodu streamování. Vybereme *RTP/MPEG Transport Stream* a dáme *Přidat*. Otevře se další okno, kde zadáme multicástovou adresu, na které bude stream vysílat. V našem případě to byla adresa *224.1.1.90* s portem *5004*. V dalším okně je potřeba zrušit možnost *Aktivovat překódování* a poté stiskneme *Proud*.

Na straně klienta v programu VLC přejdeme do nabídky *Médium/Otevřít síťový proud*, kde zadáme multicastovou adresu, která je nastavená na straně serveru *rtp://@224.1.1.90.5004* a zvolíme *Přehrát*.

Konfigurace služby VoIP

Pro službu VoIP je využita pobočková ústředna PBX Asterisk. Tato ústředna je nainstalována na straně serveru. Na klientské straně jsou využité telefony Grandstream GXV3140. Tyto telefony jsou zaregistrované jako SIP účty v ústředně asterisku.

Asterisk je open-source softwarová PBX určená pro instalaci na standardních PC a spolu se správným rozhraním může být použita jako PBX pro domácí uživatele, podniky, poskytovatele VoIP služeb a telefonní společnosti.

Na straně serveru probíhala instalace a konfigurace v příkazovém řádku. Instalaci Asterisku lze provést příkazem:

```
apt-get install asterisk
```

Během instalace je potřeba vyplnit mezinárodní předvolbu, tedy pro Českou republiku 420. Pro konfiguraci je potřeba editovat dva konfigurační soubory, *sip.conf* a *extension.conf*.

V souboru *sip.conf* se provádí konfigurace všech přípojek k zařízení využívajících protokol SIP. Pomocí libovolného textového editoru otevřeme tento soubor.

```
nano /etc/asterisk/sip.conf
```

```
[general]
port=5060
allow=all
binaddr=0.0.0.0
[1000]
type=friend
host=dynamic
secret=1000
[1001]
type=friend
host=dynamic
secret=1001
```

Poté je potřeba editovat soubor *extensions.conf*. V tomto konfiguračním souboru je definován číslovací plán ústředny. Číslovací plány jsou součástí kontextů.

```
nano /etc/asterisk/extensions.conf
[default]
exten=>1000,1,Dial(SIP/1000)
exten=>1001,1,Dial(SIP/1001)
```

Po editaci a uložení předešlých souborů je potřeba restartovat asterisk. To se provede příkazem: */etc/init.d/asterisk restart*. Spuštění asterisk se provádí příkazem: *asterisk -cvvv*. Parametr *-c* definuje otevření konzole, parametr *-v* definuje úroveň podrobnosti výpisu.

Po zaregistrování telefonu (nebo VoIP aplikace) do stejné sítě jako je ústředna asterisk, tak se telefony automaticky zaregistrují. Tato registrace může trvat i několik minut. Po registraci se objeví v CLI asterisk výpis o registraci.

Konfigurace služby Data

Na virtuálním stroji byl vytvořený webový server. Pro vytvoření webového serveru byl nainstalovaný ApacheHTTP(HyperText Transfer Protocol) server. Uživatel se může k danému serveru připojit vzdáleně, a to zadáním IP adresy do internetového prohlížeče. Na webovém serveru se nachází sekce pro stahování a nahrávání.

7.2 Používané měřicí přístroje a programy

7.2.1 EXFO FTB-1/FTB-860 NetBlazer

FTB1 je modulární platforma pro rychlé a výkonné testování FTTH, FTTD, Ethernetu a TDM. Obsahuje FTB-860 NetBlazer modul, který se využívá pro ověřování Ethernetových služeb pomocí obousměrného testování standardy RFC 2544 a ITU-T Y.155sam (EtherSAM) a další testy, jako např. BERT test. NetBlazer je vybaven dvěma ethernetovými porty 10/100/1000 BASE-TX a dvěma SFP porty 100/1000 BASE-FX.

Konfigurace

FTB-1 platforma pracuje pod operačním systémem Windows XP. Po přihlášení do systému se spustí modul FTB-860 NetBlazer. Toto zařízení bylo použito pro dva testy. V prvním případě byl připojen na switch XGS-4528F a sloužil jako vzdálená jednotka k provedení Dual testu RFC2544. V druhém případě byl připojen k DSL modemu pro provedení EtherSAM testu. Nejdříve bylo potřeba vybrat port, přes který probíhalo měření.

- Port: Port 1
- Interface Type: 10/100/1000 Mbit/s Eletrical

Dále v záložce Network povolíme DHCP.

- DHCP: Enabled
- Default Gateway: Enabled

7.2.2 EXFO AXS-200/850

EXFO AXS-200/850 je ethernetový analyzátor, který je vhodný k ověření kvality služeb v přístupových a metropolitních sítích. Disponuje jedním metalickým portem 10/100/1000 Base-T Ethernet a jedním optickým portem Gigabit Ethernet. Je vhodný pro měření Dual testu RFC2544, generování provozu a testování bitové chybovosti (BERT test). Dále disponuje funkcí Smart Loopback.

Konfigurace

I v tomto případě bylo zařízení použito pro dva různé testy a to pro Dual test RFC2544 a test EtherSAM. Nejprve je potřeba nastavit port v záložce Setup/Interface/Port:

- Auto-Negotiation: Enabled
- Speed: 100 Mbit/s
- Duplex: Full
- Flow Control: None

Dále v záložce Setup/Interface/Network povolíme DHCP.

- DHCP: Enabled
- Default Gateway: Enabled

7.2.3 EXFO AXS-200/625

EXFO AXS-200/625 je zařízení pro testování Triple Play služeb - IPTV, VoIP a datové přenosy. Umožňuje měření IPTV parametrů jako ztrátovost paketů, PCR jitter, packet jitter, MDI, PID viewer a IGMP zap time. Dále umožňuje monitorování VoIP, statistiky umožňující GoS metriky, posuzování internetového připojení pomocí traceroute, ping a HTTP/FTP rychlostní testování. [27]

Konfigurace

Zařízení bylo použito pro analýzu IPTV provozu. Nejprve je potřeba v záložce *DSL/IP Tests/Connection Setup/ Selected profile* nastavit:

- Line Mode: Ethernet
- Access Mode: Routed Ethernet DHCP

Dále je potřeba v záložce *IPTV Analysis* nastavit délku monitorování a v záložce *IGMP Monitor* se pomocí Join připojíme na požadovanou multicastovou adresu 224.1.1.90.

7.2.4 EXFO FTB-500

EXFO FTB-500 je univerzální platforma, která obsahuje 8 slotů pro samotné měřicí moduly. Využívá operační systém Windows XP.

Pro měření byly využity tyto moduly:

FTB-5240B

FTB-5240B modul představuje optický spektrální analyzátor (Optical Spectrum Analyzer - OSA). Jeho základní specifikace jsou:

- Rozsah vlnových délek: 1250 - 1650 nm
- Šířka šterbiny (FWHM): 0,033 nm
- Dynamický rozsah: -80 - +18 dBm
- Rozteč kanálů: 12,5 - 200 GHz (CWDM)

FTB-5500B

Jedná se o PMD (Polarization Mode Dispersion) modul, který umožňuje měření polarizačně vidové disperze. Rozsah vlnových délek je 1260 až 1675 nm a citlivost je - 47 dBm.

FTB-5800B

Jedná se o CD (Chromatic Dispersion) modul, který se využívá pro měření chromatické disperze. Rozsah vlnových délek je 1530 až 1625 nm/ 1200 až 1700 nm.

FTB-7200D

Jedná se o OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) modul. Je optimalizovaný pro testování jednovidových i mnohovidových vláken. Pro jednovidová vlákna se využívají vlnové délky 1310 nm a 1550 nm, pro mnohovidová vlákna se využívají vlnové délky 850 nm a 1300 nm. Dynamický rozsah je až 36 dB s mrtvou zónou menší než 1 metr [27].

7.2.5 MSU Video Quality Measurement Tool

MSU Video Quality Measurement Tool (VQMT) je program pro posouzení objektivní kvality videa. Porovnává dvě videa, jedno referenční a jedno analyzované. Tento program je dostupný ve volné verzi a ve placené verzi. Ve volné verzi není možné testovat videa ve kvalitě HD a vyšší. Poskytuje 20 objektivních metrik (PSNR, MSE, SSIM, MSAD a další) a podporuje přes 20 video formátů.

7.2.6 IxChariot

IxChariot je nástroj, který slouží pro posuzování výkonu komplexních sítí. Vytváří až 100 tisíc spojení mezi jednotlivými endpointy, které reprezentují koncové uživatele. Podporuje protokoly TCP, UDP, RTP a IPv4/6.

7.3 Měření útlumu optické trasy

Měření útlumu optických tras bylo provedeno metodou 1C a pomocí metody OTDR (EXFO FTB-7200D). Jedná se o metodu zpětného rozptylu (Rayleighův rozptyl). Vysílaný optický signál je zpětně rozptýlený v různých bodech vlákna zpět do vstupu vlákna. Použité optické vlákno je typu G.652.A. Optické trasy jsou sestaveny optickými vlákny o délce 5 a 10 km. Tyto vlákna jsou více než 20 let stará a jsou propojena řadou svárů, spojek a konektorů. Proto jsou hodnoty útlumu výrazně vyšší. Průměrná hodnota měrného útlumu, která byla vypočítaná ze všech jednotlivě měřených optických tras, je pro vlnovou délku 1550 nm 0,5 dB/km. Pro 1310 nm je tato hodnota vyšší a to téměř 0,58 dB/km. Pro měření je potřeba použít předřadné vlákno, pro potlačení vstupní mrtvé zóny. V tabulce 6 jsou zobrazeny naměřené hodnoty optických tras.

Tabulka 6: Útlum optických tras

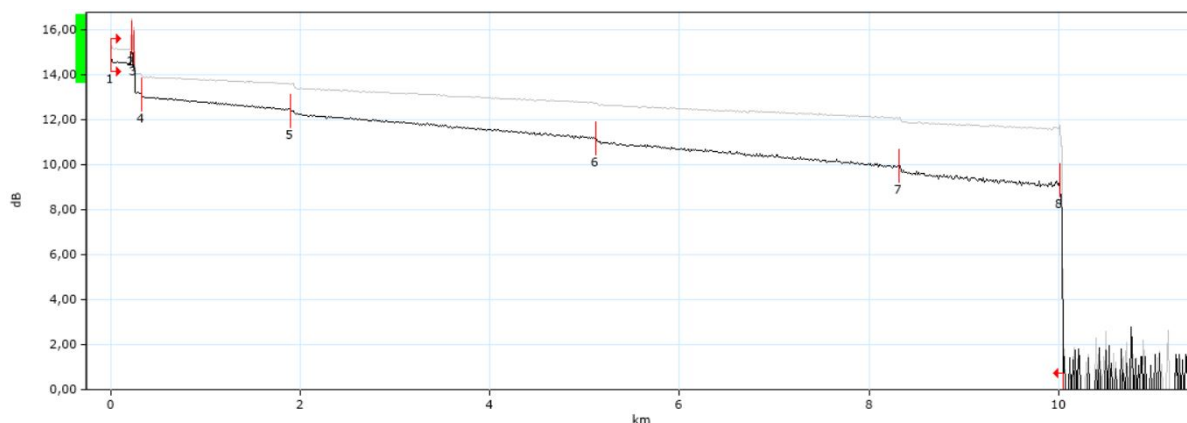
L [km]	1310 nm		1550 nm	
	IL [dB]	α [dB/km]	[dB/km]	α [dB/km]
5,04	2,851	0,566	2,552	0,506
9,82	4,728	0,483	3,167	0,323
14,81	8,546	0,577	8,073	0,545
19,58	12,579	0,642	9,429	0,481
24,635	15,183	0,616	12,724	0,516
29,419	17,094	0,584	16,804	0,571
35,41	19,472	0,567	18,791	0,546

Na obrázku 19 je zobrazen reflektogram pro optickou trasu o délce 9,82 km. V první části je vidět použité předřadné vlákno o délce 222,5 m. Poté následuje 27 m dlouhé vlákno, které je využito pro propoj laboratoří EB315 a EB316, dále následuje optická trasa. Události 4, 5, 6 a 7 jsou spoje vláken. Událost číslo 8 je odraz na konci trasy.

7.4 Měření chromatické disperze (CD)

Chromatická disperze vzniká z důvodu různé rychlosti různých spektrálních složek v optickém vlákne. To znamená, že některé spektrální složky se budou zpožďovat oproti jiným. Vyskytuje se jen u jednovidových vláken.

Chromatická disperze byla měřena u optických tras jako v předešlém bodě. Pro měření byl využit CD modul (FTB-5800B) a širokopásmový laserový zdroj (FLS-5800A).



Obrázek 19: Reflektogram pro optickou trasu 9,82 km

Pro každou optickou trasu musela být nastavena délka vlákna, kterou jsme naměřili při OTDR měření. V tabulce 6 jsou zobrazeny změřené hodnoty chromatické disperze pro jednotlivé trasy pro vlnovou délku 1550 nm.

Tabulka 7: Měření chromatické disperze na optických trasách

Délka [km]	CD [ps/(nm×km)]	Slope [ps/nm ²]
5,040	16,635	0,298618
9,820	16,641	0,580502
14,810	16,395	0,876866
19,580	16,662	1,153776
24,635	16,655	1,446242
29,419	16,668	1,715052
35,410	16,060	2,038351

7.5 Měření Polarizačně vidové disperze (PMD)

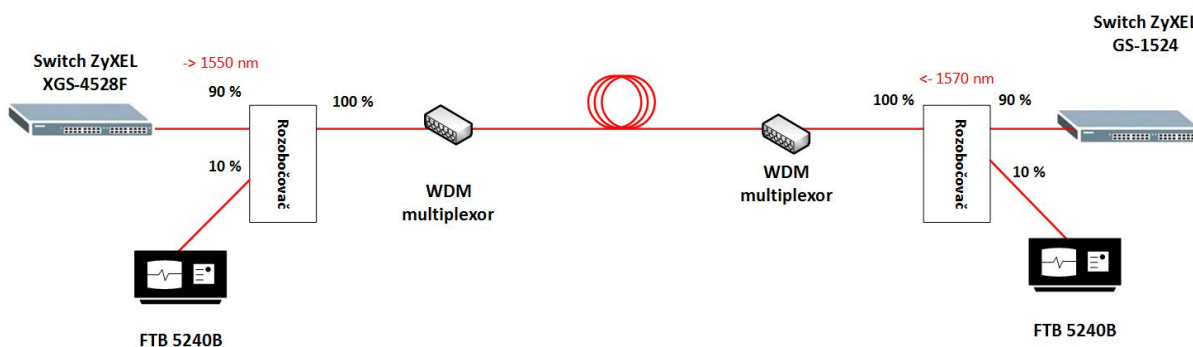
Polarizačně vidová disperze vzniká kvůli rozdílné délce trasy obou polarizačních rovin vidu při průchodu vláknem. PMD byla měřena na stejných optických trasách a pro měření byl využit PMD modul (FTB-5500B) a širokopásmový laserový zdroj (FLS-5800A). V tabulce 7 jsou zobrazeny naměřené hodnoty polarizačně vidové disperze pro jednotlivé trasy.

Tabulka 8: Měření polarizačně vidové disperze na optických trasách

Délka [km]	PMD [ps]	Koeficient PMD [ps/km ^{1/2}]
5,040	0,410	0,182
9,820	1,346	0,429
14,810	0,598	0,155
19,580	2,786	0,630
24,635	2,703	0,545
29,419	3,339	0,616
35,410	2,994	0,503

7.6 Spektrální analýza optické sítě

Pro měření optického spektra bylo využito spektrálního analyzátoru EXFO FTB-5240B. Pro měření bylo nutné využít i optického děliče s poměrem 90:10. To znamená, že 90% signálu je vysíláno dál sítí a 10% signálu je přivedeno do optického spektrálního analyzátoru. Topologie pro měření optického spektra je zobrazena na obrázku 20.

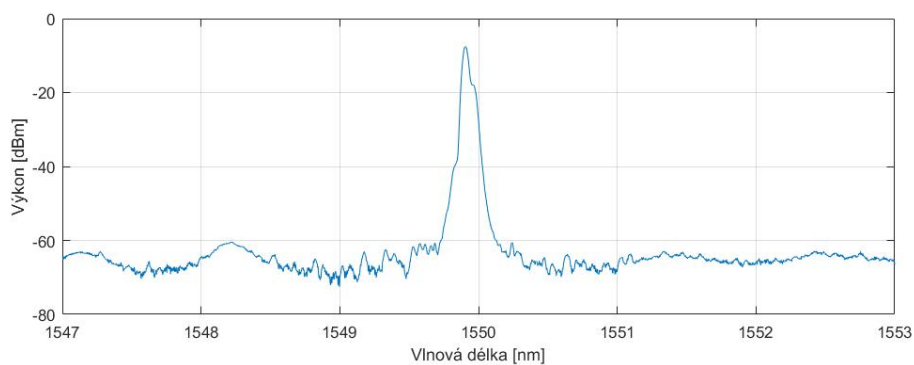


Obrázek 20: Topologie pro měření optického spektra

V tabulce 9 jsou zobrazeny naměřené parametry pro downstream na vlnové délce 1549,921 nm. Na obrázku 21 je poté vidět vykreslené spektrum při trase 9,82 km.

Tabulka 9: Parametry pro 1 kanál ve směru downstream

	Downstream (1549,921 nm)		
Délka [km]	Výkon signálu [dBm]	SNR [dB]	Výkon šumu [dB]
0	-1,62	47,53	-49,15
5,040	-4,83	46,93	-51,76
9,820	-6,4	46,24	-52,64
14,810	-9,54	46	-55,54
19,580	-12,44	46,25	-58,69

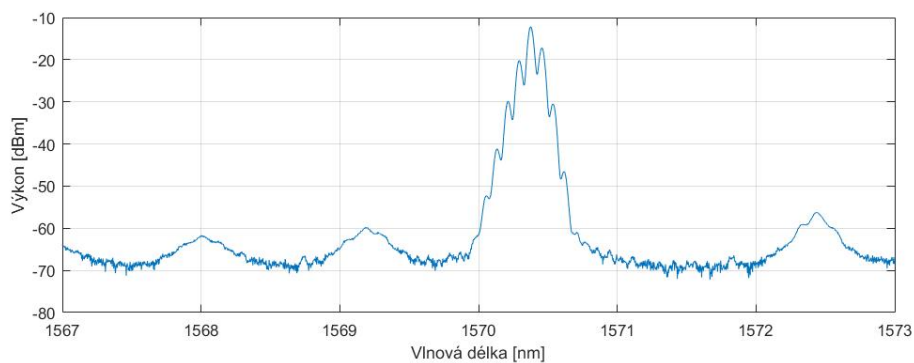


Obrázek 21: Optické spektrum při optické trase 9,82 km, downstream

Na obrázku 22 je zobrazeno optické spektrum ve směru upstream na vlnové délce 1570,384 nm. Změřené parametry jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10: Parametry pro 1 kanál ve směru upstream

Délka [km]	Upstream (1570,384 nm)		
	Výkon signálu [dBm]	SNR [dB]	Výkon šumu [dB]
0	-5,04	28,63	-33,66
5,040	-8,27	30,76	-39,03
9,820	-9,63	29,93	-39,55
14,810	-13,48	30,32	-43,8
19,580	-15,72	30,46	-46,17



Obrázek 22: Optické spektrum při optické trase 9,82 km, upstream

7.7 ADSL2+ a VDSL2 přenosové rychlosti

Pro měření přenosových vlastností u ADSL2+ byl použit přístroj VeEX VePAL BX100V. Jedná se o emulační modem pro měření na ADSL/ADSL2/ADSL2+. Byly proměřeny všechny profily, které byly nastavené na ADSL2+ a VDSL2 DSLAMu. Níže budou ukázány výsledky jen z

jednoho portu u ADSL2+ a jednoho portu VDSL2, na kterých budou proměřeny integrita sítě a vlastnosti jednotlivých služeb.

V tabulce 11 lze vidět vybrané profily. V tabulce 12 jsou uvedeny naměřené přenosové rychlosti při změně metalického vedení pro vybraný profil na ADSL2+. Měření bylo provedeno 10 x a v tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty tohoto měření.

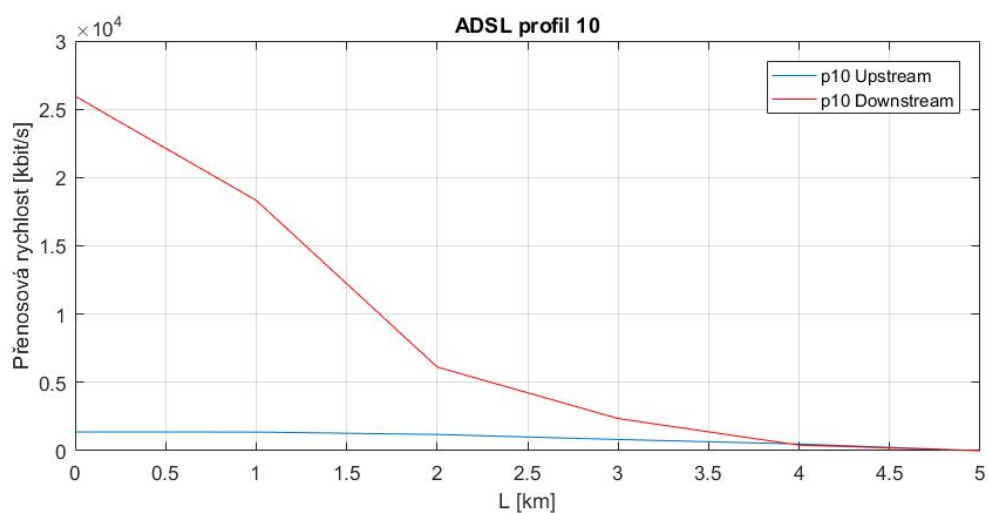
Tabulka 11: Zvolené profily pro ADSL2+ a VDSL2

	ADSL2+ (port 10)	VDSL2 (port 10)
Nastavené rychlosti (upstream/downstream) [Mbit/s]	4,096/32	45,440/60

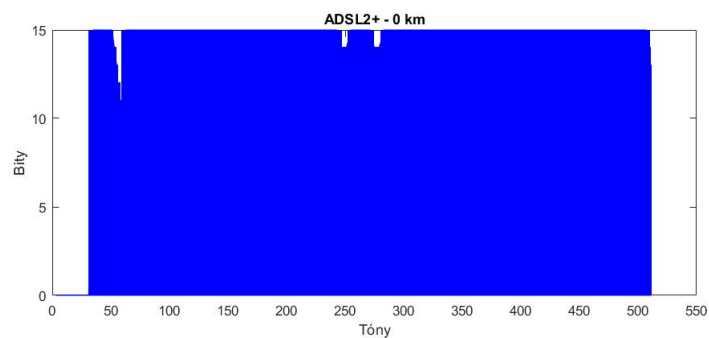
Tabulka 12: Naměřené přenosové rychlosti pro profil na portu 10 u ADSL2+

Přenosová rychlost [Mbit/s]						
	Délka metalického vedení [km]					
	0	1	2	3	4	5
Upstream	1,380	1,366	1,189	0,823	0,491	Nepřipojeno
Downstream	25,955	18,330	6,128	2,355	0,408	Nepřipojeno

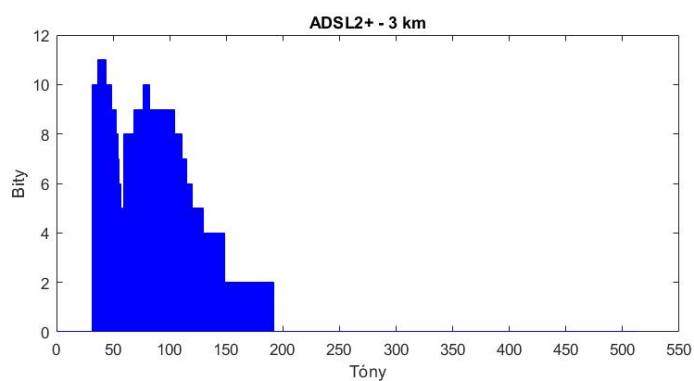
Přenosové rychlosti klesají s rostoucí délkou metalického vedení. Také si můžeme všimnout, že přenosové rychlosti jsou mnohem nižší než nastavené, hlavně u upstreamu, kde místo 4,096 Mbit/s se přenosová rychlost byla 1,38 Mbit/s při 0 km metalického vedení. Na obrázku 23 je zobrazena závislost přenosové rychlosti na délce metalického vedení pro vybraný profil. Na obrázku 24 je pak zobrazeno rozprostření bitů mezi tóny pro délky metalického vedení 0 a 3 km. Můžeme vidět, že při vyšší délce trasy dochází k utlumení vyšších tónů. To vede ke snížení přenosové rychlosti.



Obrázek 23: Závislost přenosové rychlosti na délce metalického vedení u vybraného profilu ADSL2+



(a) 0 km



(b) 3 km

Obrázek 24: Rozprostření bitů mezi tóny pro 0 km a 3 km

Pro zjištění přenosových rychlostí na VDSL2 nebylo přístupné žádné měřicí zařízení, a proto bylo nutné zjistit dané hodnoty přímo ve VDSL2 modemu. Pomocí emulačního terminálu PuTTY jsem se dostal do nastavení modemu. Po zvolení možnosti System Maintenance a poté

Command Interpreter Mode se dostaneme do příkazového řádku modemu. Po napsání příkazu vds1 status se zobrazí informace o modemu včetně přenosových rychlostí. Tabulka 13 zobrazuje vliv metalického vedení na přenosovou rychlost u vybraného profilu VDSL2.

Tabulka 13: Naměřené přenosové rychlosti pro profil na portu 10 u VDSL2

Přenosová rychlost [Mbit/s]							
	Délka metalického vedení [km]						
	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Upstream	35,968	21,120	0,672	0,704	0,704	0,704	Nepřipojeno
Downstream	59,968	49,600	23,520	14,688	6,176	3,680	Nepřipojeno

8 Ověření integrity sítě

Ověření integrity sítě bylo využito testů RFC 2544 a ITU-T Y.1564 EtherSAM. Testy a výsledky testů jsou popsány dále v kapitole.

8.1 RFC 2544

Doporučení RFC 2544 (Request For Comment) byl vytvořen organizací IETF (Internet Engineering Task Force) v roce 1999. Původně byl vyvinut pro testy v laboratorních podmínkách a i přes jeho nedostatky jsou testy RFC 2544 základními testy pro síťová zařízení. V dnešní době na RFC 2544 navazují novější doporučení jako například Y.156sam. RFC 2544 obsahuje testování propustnosti (Throughput), zatížitelnosti (Back-to-back), ztrátovosti (Frame loss) a zpoždění (Latency) [29].

Propustnost

Cílem testu propustnosti je zjistit maximální možnou rychlost přenášení datových rámců, aniž by došlo ke ztrátě či zahození rámce. Nejprve je analyzátozem vygenerován určitý počet rámců, které posílá určitou rychlostí. Poté čeká, kolik rámců se vrátí zpět. Pokud je shodný počet přijatých a odeslaných rámců, tak dojde ke zvýšení počtu rámců, které posílá a test se opakuje. Test je ukončen ve chvíli, kdy je počet přijatých rámců nižší než počet odeslaných rámců [29].

Zatížitelnost

Test zatížitelnosti spočívá v tom, že se vysílá burst (shluk rámců s minimální mezirámcovou mezerou) a analyzátor počítá, kolik rámců se vrátí zpět. Když je počet odeslaných rámců roven počtu přijatých rámců, tak se zkrátí mezirámcová mezera a test se opakuje. Test se opakuje do té doby, než dojde ke ztrátě rámců. Výsledné hodnoty těchto testů se průměrují [29].

Ztrátovost

Měření ztrátovosti má určit poměr ztrátovosti v celém rozsahu rychlostí a velikostí rámců. V prvním kroku je nastavena rychlost odeslaných rámců na 100% rychlosti rozhraní media. V dalších krocích dochází ke snižování propustnosti vždy o 10%. Test probíhá do té doby, dokud neproběhnou dva úspěšné testy po sobě bez ztráty rámce [29].

$$\frac{(\text{počet}_{\text{přijatých}} - \text{počet}_{\text{odeslaných}}) \times 100}{\text{počet}_{\text{odeslaných}}} \quad (8)$$

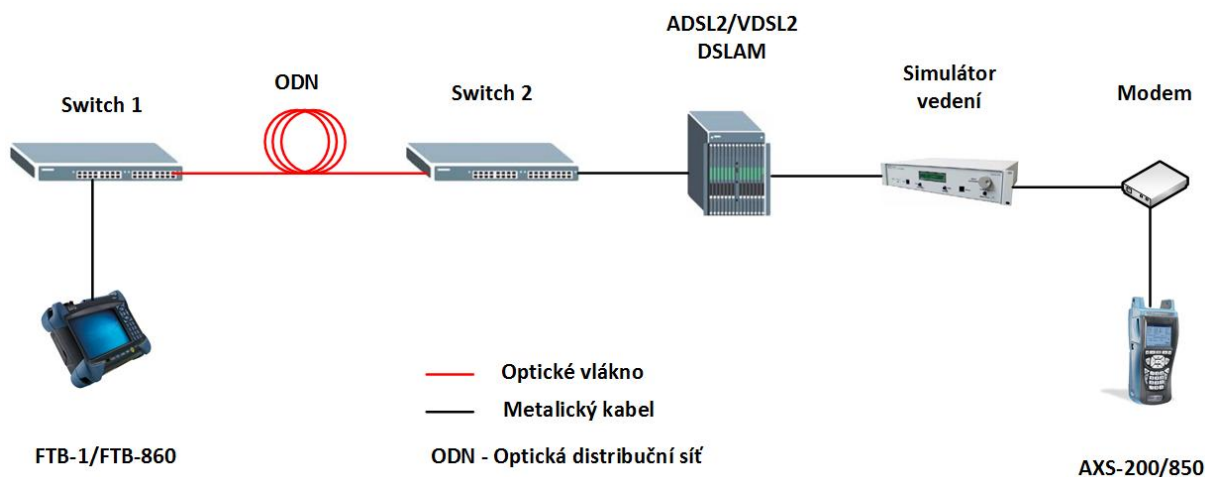
Zpoždění

Cílem měření zpoždění je určit dobu, po kterou trvá přenos rámce. V prvním kroku se musí určit propustnost pro jednotlivé velikosti rámce. Poté se posílá proud rámců danou rychlostí. Následně je čas, kdy je rámec odeslán uložen a označen časovou známkou A. Přijímač musí

rozeznat daný rámec a zaznamená čas přijetí a uloží tento čas jako časovou známku B. Zpoždění je rozdíl časové známky B mínus časová známka A. Měření se musí opakovat 20x a výsledná hodnota se určí jako průměr těchto měření [29].

8.1.1 Testování RFC 2544 pro ADSL2+

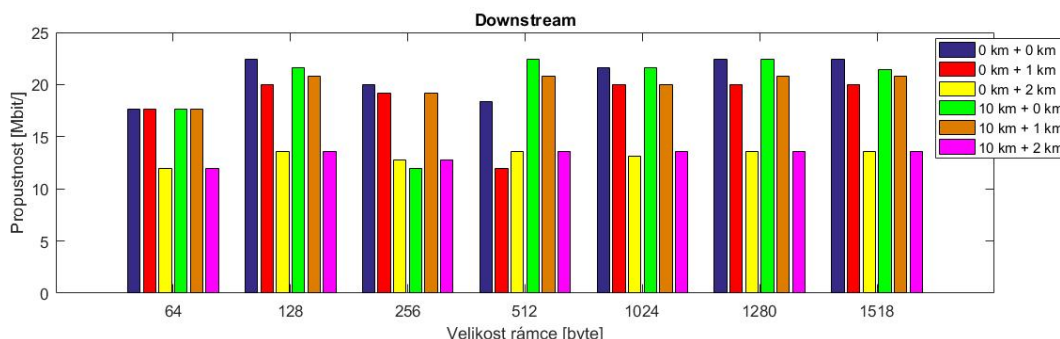
Testem RFC 2544 ověříme integritu sítě a zjistíme zda je topologie vhodná pro nasazení požadovaných služeb. Test probíhal pro optickou trasu 0 a 10 km a pro délky metalického vedení 0 km, 1 km respektive 2 km. Pro testování ADSL2+ byl vybrán port 10 na ADSL2+ DSLAMu, kde byla nastavená rychlost 32 Mbit/s pro downstream a 4,096 Mbit/s pro upstream. Měření bylo nastaveno na Dual Test (testování v obou směrech), kde měřící zařízení AXS-200/625 sloužilo jako lokální jednotka a zařízení FTB-1/FTB-860 sloužilo jako vzdálená jednotka. Topologie sítě je zobrazena na obrázku 25.



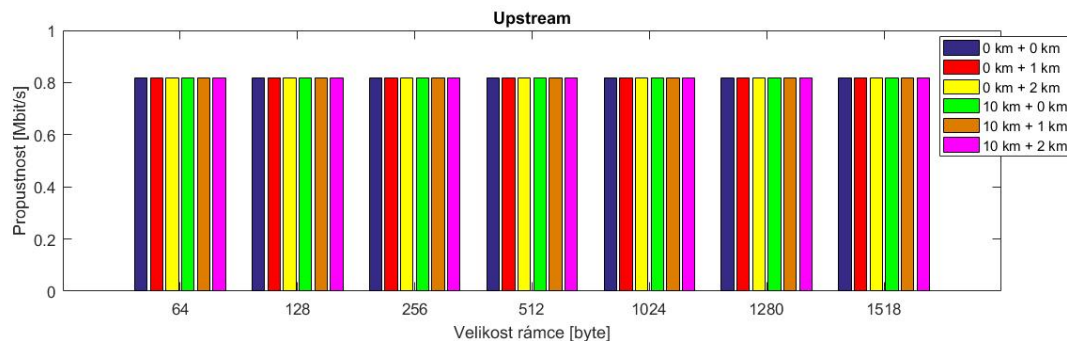
Obrázek 25: Topologie při ověřování integrity sítě podle standardu RFC 2544

RFC 2544 - ADSL2+ - propustnost

Test probíhal pro velikost rámců 64, 128, 256, 512, 1024, 1280 a 1518 bytů. Výsledky pro vzestupný a sestupný směr jsou zobrazeny na obrázcích 26 a 27.



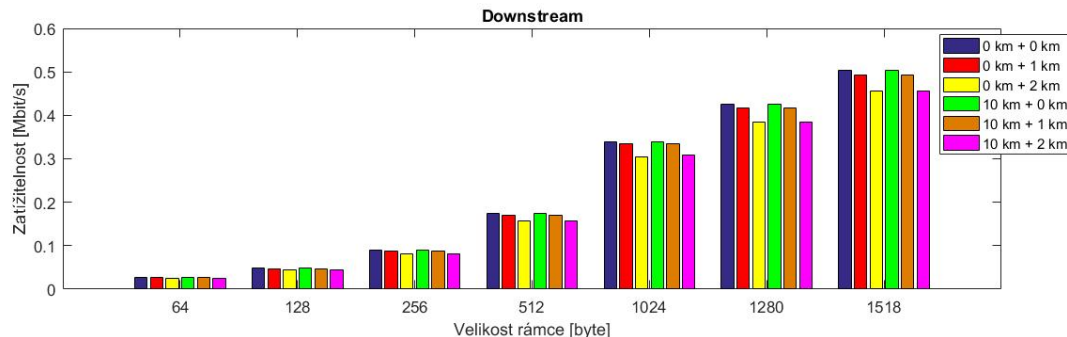
Obrázek 26: Propustnost pro sestupný směr u ADSL2+



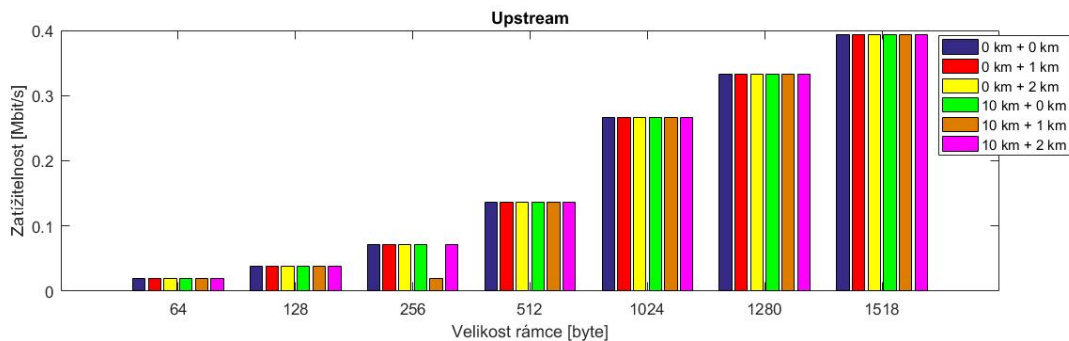
Obrázek 27: Propustnost pro vzestupný směr u ADSL2+

Z výsledků můžeme říct, že optická trasa nemá vliv na propustnost. Hlavní vliv měla metalická trasa. U sestupného směru byla naměřena nejvyšší přenosová rychlost pro 0 km dlouhou metalickou trasu a to přes 22,4 Mbit/s. Při navyšování metalické trasy na 2 km spadla přenosová rychlost na hodnotu okolo 13,6 Mbit/s. Na rámci o velikosti 64 bajtů byla přenosová rychlost nižší, než na rámcích o větších velikostech. To je způsobeno tím, že modem není schopný zpracovávat vyšší počet rámců o menší velikosti. V případě vzestupného směru byla naměřena přenosová rychlost 0,819 Mbit/s a délka optické i metalické trasy nemá takový vliv. Přenosová rychlost ve vzestupném směru by byla nižší až při vyšších vzdálenostech metalické trasy.

RFC2544 ADSL2+ - zatížitelnost



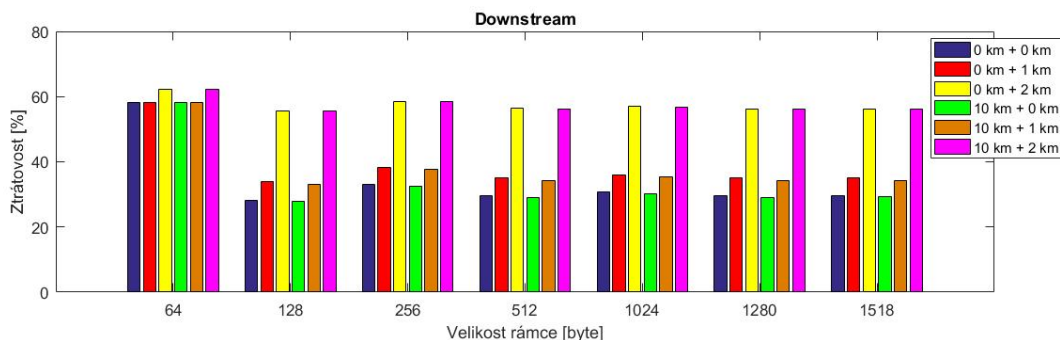
Obrázek 28: Zatížitelnost pro sestupný směr u ADSL2+



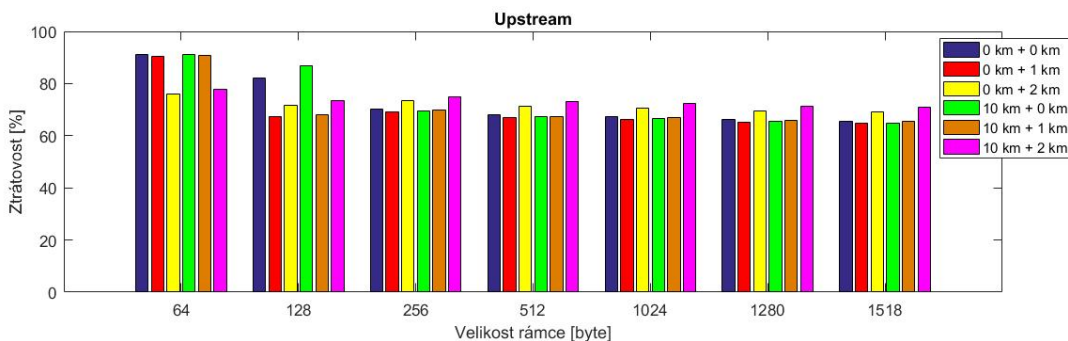
Obrázek 29: Zatížitelnost pro vzestupný směr u ADSL2+

Na obrázcích 28 a 29 je zobrazena zatížitelnost pro sestupný a vzestupný směr. Na zatížitelnost nemá vliv optická ani metalická trasa. Rozdíl je pouze mezi různými velikostmi rámců, kde se zvyšující velikostí rámce roste i hodnota zatížitelnosti. Avšak hodnota zatížitelnosti je hodně nízká. To je zřejmě způsobeno aktivními prvky v topologii sítě (switche, DSLAM a modem).

RFC 2544 ADSL2+ - ztrátovost paketů



Obrázek 30: Ztrátovost pro sestupný směr u ADSL2+

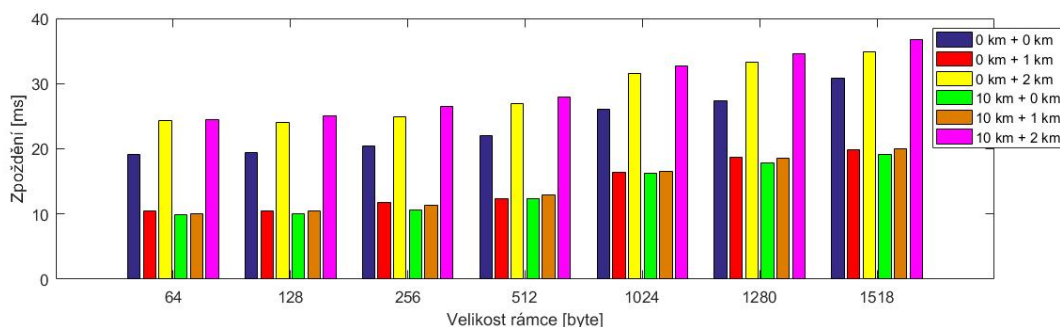


Obrázek 31: Ztrátovost pro vzestupný směr u ADSL2+

Na obrázcích 30 a 31 je zobrazena ztrátovost paketů pro sestupný a vzestupný směr. Pro ztrátovost paketů opět neměla vliv délka optické trasy, ale délka metalické trasy, kdy s rostoucí

vzdáleností metalické trasy rostla i ztrátovost paketů. U sestupného směru byla naměřena nejvyšší hodnota při vzdálenosti metalické trasy 2 km a velikosti rámce 64 bajtů a to 62%. S rostoucí velikostí rámce se hodnota ztrátovosti paketů snížila. Pro vzestupný směr byla ztrátovost ještě vyšší, než v případě sestupného směru. Ztrátovost paketů je způsobena nižšími přenosovými rychlostmi v obou směrech, než byla nastavena v testu.

RFC 2544 ADSL2+ - zpoždění



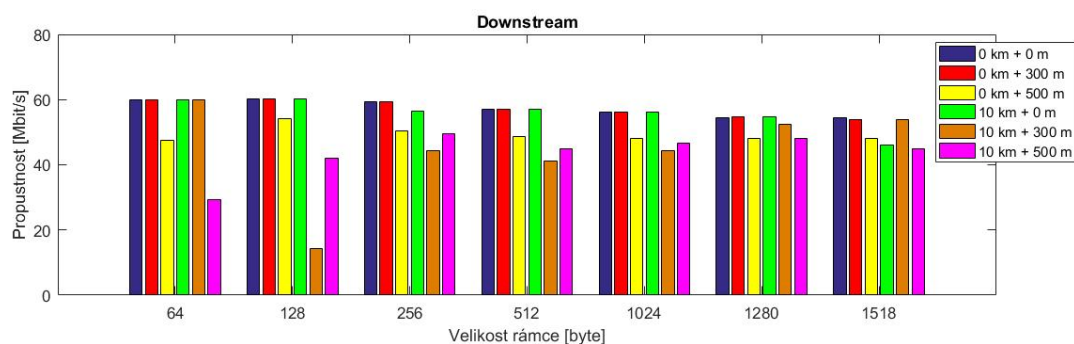
Obrázek 32: Zpoždění u ADSL2+

Na obrázku 32 můžeme vidět test zpoždění u ADSL2+. Zpoždění je ovlivňováno délkou metalické trasy a velikostí rámce. Nejvyšší zpoždění bylo naměřeno při vzdálenosti metalické trasy 2 km a velikosti rámce 1518 bajtů. Na trase 0 km u optické trasy a 0 km u metalické trasy je zpoždění o 10 ms vyšší, než v případě optické trasy 10 km a metalické trasy 0 km.

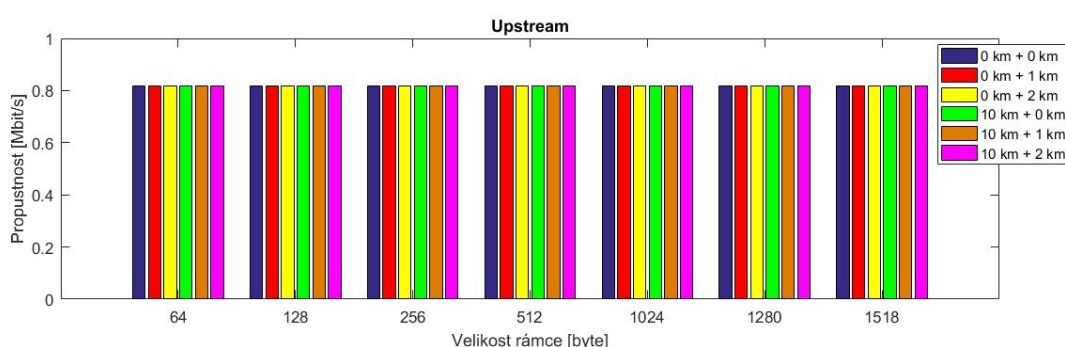
8.1.2 Testování RFC 2544 pro VDSL2

Pro testování sítě s VDSL2 byla použita stejná topologie jako u měření ADSL2+. Rozdíl je pouze ve vzdálenostech metalické trasy, kdy pro VDSL2 byly použity trasy 0 m, 300 m a 500 m. Byl testován profil na portu 10, který měl přenosové rychlosti pro sestupný směr 60 Mbit/s a pro vzestupný směr 45,44 Mbit/s. Tyto hodnoty byly nastaveny i pro měření Dual testu RFC 2544.

RFC 2544 VDSL2 - propustnost



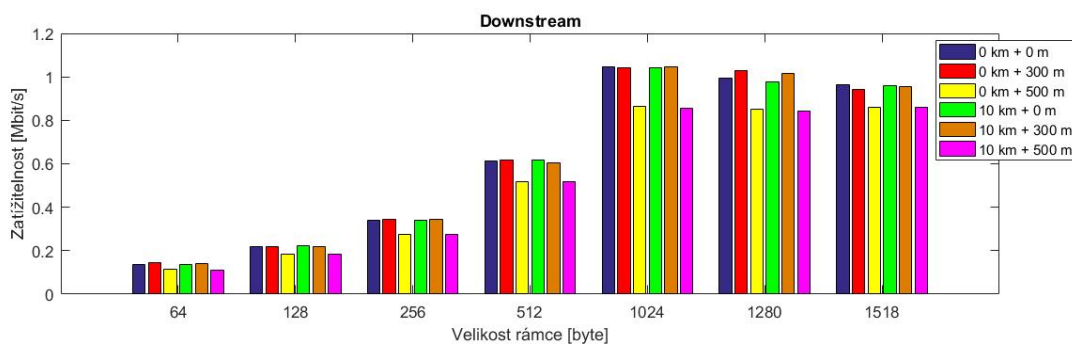
Obrázek 33: Propustnost pro sestupný směr u VDSL2



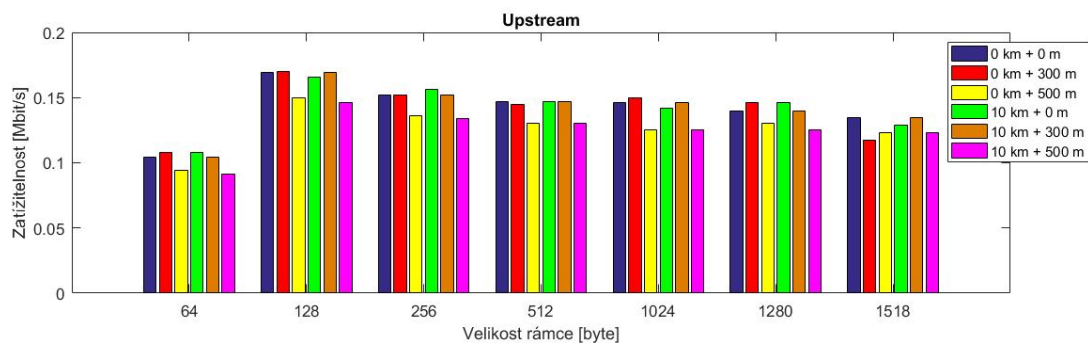
Obrázek 34: Propustnost pro vzestupný směr u VDSL2

Na obrázcích 33 a 34 je zobrazena propustnost u VDSL2 pro sestupný a vzestupný směr. Na měření propustnosti měla menší vliv délka optické trasy, ale větší vliv měla metalická trasa. U sestupného směru rozdíl mezi délkou metalické trasy 0 m a 500 m činil kolem 10 Mbit/s. U vzestupného směru, kde jsou přenosové rychlosti o něco nižší nemá optická trasa na propustnost vliv. Ale u metalické trasy je rozdíl mezi délkami tras 0 m a 500 m kolem 9 Mbit/s.

RFC 2544 VDSL2 - zatížitelnost



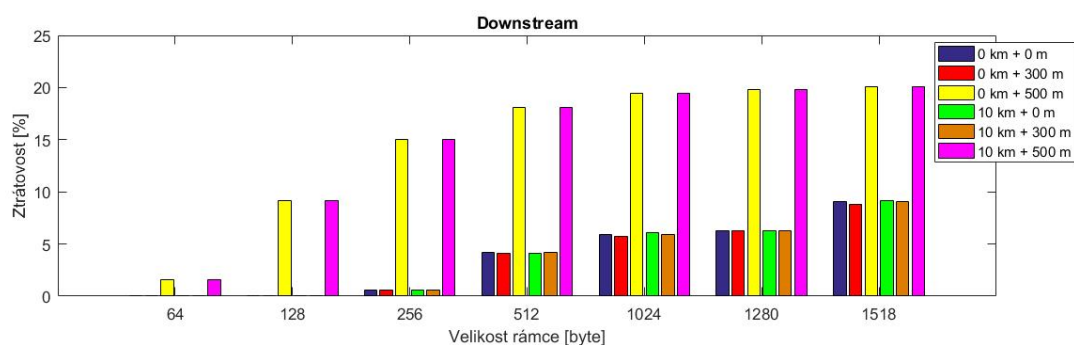
Obrázek 35: Zatížitelnost pro sestupný směr u VDSL2



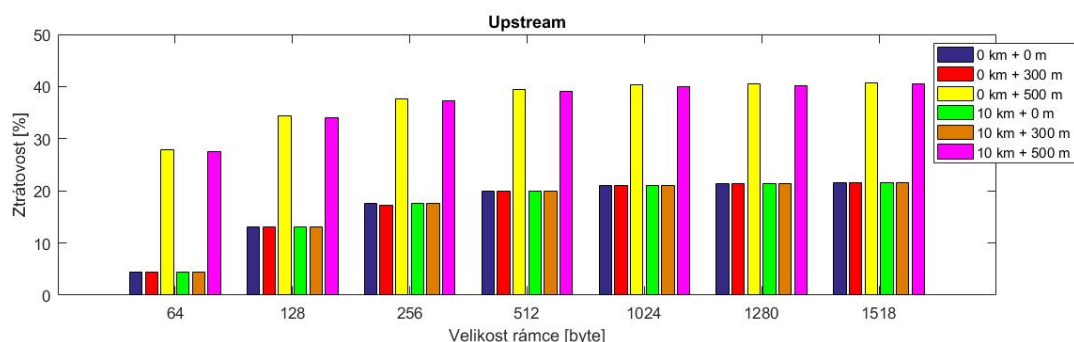
Obrázek 36: Zatížitelnost pro vzestupný směr u VDSL2

Z obrázků 35 a 36 je vidět, že zatížitelnost je nízká, stejně jako v případě ADSL2+. Hodnoty jsou nízké ze stejného důvodu, a to využitím aktivních prvků v síti. V případě sestupného směru zatížitelnost roste s vyšší velikostí rámce, ale v případě vzestupného směru je hodnota zatížitelnosti nejnižší na rámci 64 bytů a na dalších velikostech rámců je hodnota zatížitelnosti přibližně stejná.

RFC 2544 VDSL2 - ztrátovost paketů



Obrázek 37: Ztrátovost pro sestupný směr u VDSL2

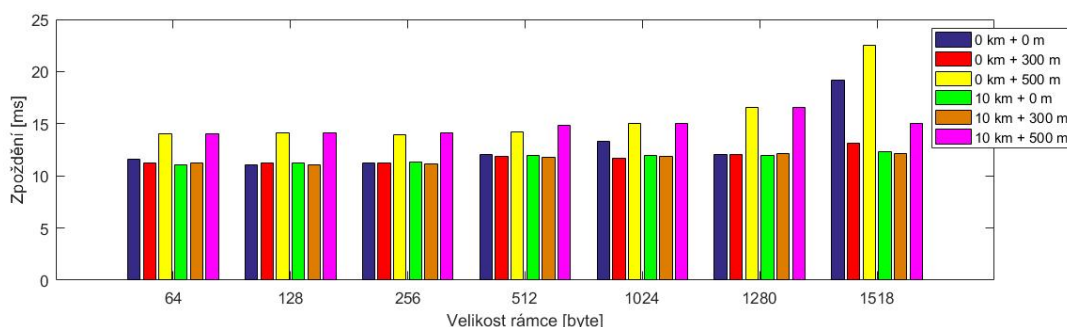


Obrázek 38: Ztrátovost pro vzestupný směr u VDSL2

Ztrátovost rámců zobrazena na obrázcích 37 a 38 je mnohem nižší než v případě ADSL2+.

Hodnoty ztrátovosti rámců rostou s vyšší velikostí rámce. U sestupného směru je ztrátovost nulová v případě 0 m metalického vedení při velikostech rámce 64 a 128 bytů. Nejvyšší ztrátovost byla naměřena v případě délky metalického vedení 500 m, kdy dosahovala hodnot kolem 20% u největších rámců. V případě vzestupného směru byly hodnoty ztrátovosti rámců větší. U největších rámců byly naměřeny hodnoty kolem 40% v případě metalického vedení 500 m. Na měření ztrátovosti neměla vliv délka optické trasy.

RFC 2544 VDSL2 - zpoždění



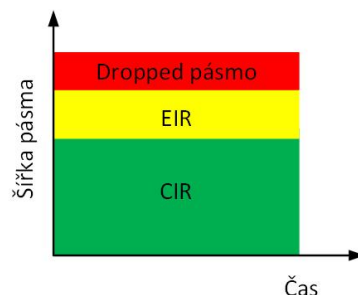
Obrázek 39: Zpoždění u VDSL2

Na obrázku 39 je zobrazeno zpoždění v případě měření na profilu VDSL2. I v tomto případě měla na měření vliv velikost metalické trasy, ale ne tak velký vliv jako v případě ADSL2+. Je to dáno i vyššími přenosovými rychlostmi, které může VDSL nabídnout. Nejvyšší naměřená hodnota zpoždění byla v případě metalické trasy 500 m a optické trasy 0 km, a to 22 ms.

8.2 EtherSAM (ITU-T Y.156sam)

Tento standard byl přijat v roce 2011. Slouží pro testování správné konfigurace sítě využívající technologii Ethernet. Obsahuje potřebné nástroje pro rychlé a efektivní testování výkonnosti. Oproti RFC 2544 je rychlejší a přesnější a pro všechny služby testuje propustnost, ztrátovost, zpoždění a variabilitu zpoždění (jitter). Provoz je rozdělen do tří tříd, kde každá třída má specifickou barvu.

- Committed Information Rate (CIR) – jedná se o tzv. zelený provoz. Je to garantovaná šířka pásma, která musí být dostupná za jakýchkoliv podmínek.
- Excess Information Rate (EIR) – jedná se o tzv. žlutý provoz. Je to šířka pásma nad CIR, kdy její dostupnost závisí na výkonnosti a vytíženosti sítě. Minimální výkonnostní cíle nejsou zaručeny.
- Discarded Traffic (Vyřazený provoz) – jedná se o tzv. červený provoz. Je to provoz nad pásmy CIR a EIR. V případě využití tohoto pásma by docházelo k rušení dalších služeb. Proto se tento provoz zahazuje [30].



Obrázek 40: Třídy provozu

8.2.1 Klíčové indikátory provozu

Klíčové indikátory provozu (KPIs – Key Performance Indicators) jsou charakterizovány indikací minimálního výkonu konkrétního profilu provozu. Síť musí v zeleném provozu garantovat minimální požadavky pro veškerý provoz[30].

Šířka pásma (Bandwidth)

Šířka pásma označuje maximální množství dat, které může být doručeno. Toto měření je poměr celkového množství odeslaného provozu během jedné sekundy[30].

Rámcové zpoždění (Frame Delay)

Rámcové zpoždění je měření časového rozestupu mezi odesláním a přijetím paketu. Toto měření je klíčovým faktorem pro hlasové aplikace, kde velké zpoždění může ovlivňovat kvalitu hovoru[30].

Ztrátovost (Frame Loss)

Ztrátovost rámců může nastat z mnoha důvodů, jako například přenosové chyby nebo přetížení sítě. Během přenosu rámce může dojít k chybě způsobenou fyzikálním jevem. To může vést k zahození rámce. Přetížení sítě také způsobí zahození rámce, protože síťové zařízení musí zahodit rámec, aby nedošlo k přetížení spojení[30].

Paketové kolísání zpoždění (Packet Jitter)

Packet jitter odkazuje na proměnlivost v čase příchodu mezi doručenými pakety. V síti jsou pakety řazeny do fronty a dál poslány v burstech do dalšího směrovače. Může nastat, že s pakety je zacházeno s různou prioritou, a to vede k přenosu paketů s rozdílnou rychlostí. Proto jsou pakety přijímané v nepravidelných intervalech[30].

8.2.2 Test síťové konfigurace služeb

Pro každou službu probíhá ramp test, který ověřuje šířku pásma a výkonnostní požadavky. V prvním kroku se testuje od minimální šířky pásma po hranici CIR. V druhém kroku se testuje

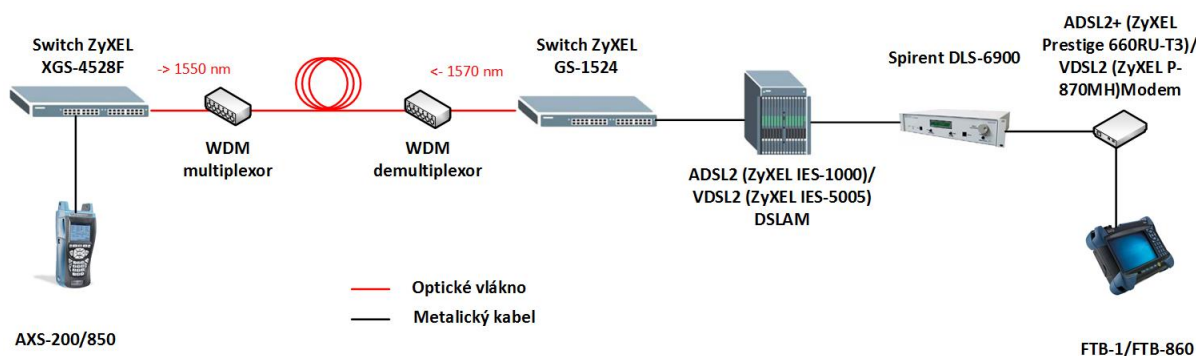
šířka pásma od hranice CIR po EIR pásmo. A ve třetím kroku se testuje nad pásmem EIR. Na konci testu síťové konfigurace je posouzeno, zda jsou síťové prvky správně nakonfigurovány a zda splňují minimální požadavky pro danou službu[30].

8.2.3 Test výkonnosti služeb

Test výkonnosti služeb se zaměřuje na dodržování QoS parametrů při testování všech služeb najednou. Tento test může trvat několik minu až několik dnů. Během této doby je sledován výkon každé služby samostatně. A pokud některá služba nesplní své výkonnostní parametry, pak je na konci test vyhodnocen jako test, který selhal[30].

8.2.4 Testování EtherSAM pro ADSL2+

Dalším testem pro ověření integrity sítě je test EtherSAM. Tento test je přesnější než předcházející test RFC2544. U daného měření nebyl použit Dual Test, a to z důvodu chybějícího přístroje pro tento test. Proto byl využit základní EtherSAM test. Nevýhodou testu je, že je limitován přenosovou rychlostí upstreamu. Proto u ADSL2+ nebyla využita služba pro IPTV, ale pouze služby VoIP a data. Jednotlivé nastavení služeb lze vidět v tabulce 14. Topologie zapojení sítě je zobrazena na obrázku 41.

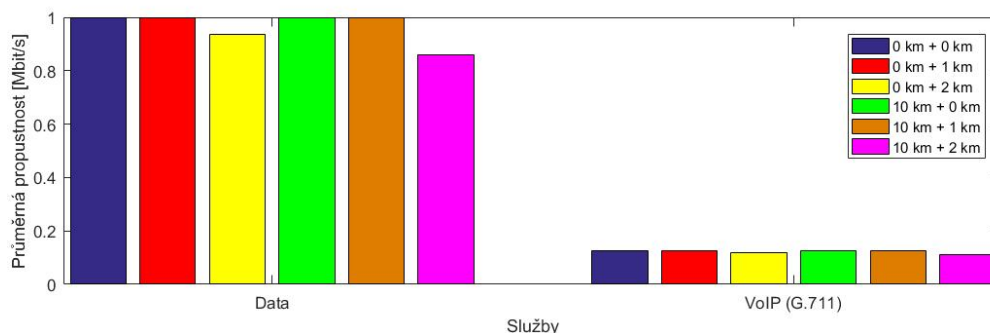


Obrázek 41: Topologie při ověřování integrity sítě podle standardu EtheSAM (ITU-T Y.156sam)

Tabulka 14: Nastavené parametry pro test EtherSAM ITU-T Y.1564 - ADSL2+

Služba	Typ služby	Profil služby	CIR [Mbit/s]	Velikost rámce [byte]
1	Data	Data	1	Náhodná
2	VoIP	G.711	0,1264	138

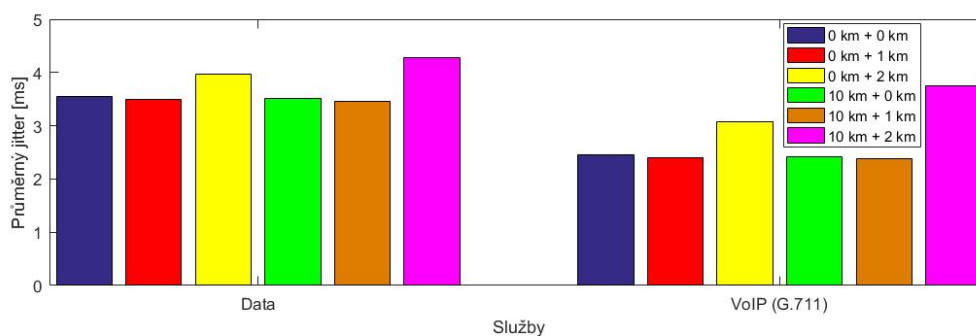
EtherSAM ADSL2+ - Propustnost



Obrázek 42: Průměrná propustnost, ADSL2+

Na obrázku 42 je zobrazena průměrná propustnost nastavených služeb. Na měření neměla vliv změna optické trasy. V případě délky metalické trasy 2 km, mírně spadla přenosová rychlost u služby data a to o 0,1 Mbit/s. V případě služby VoIP se výrazně průměrná propustnost neměnila.

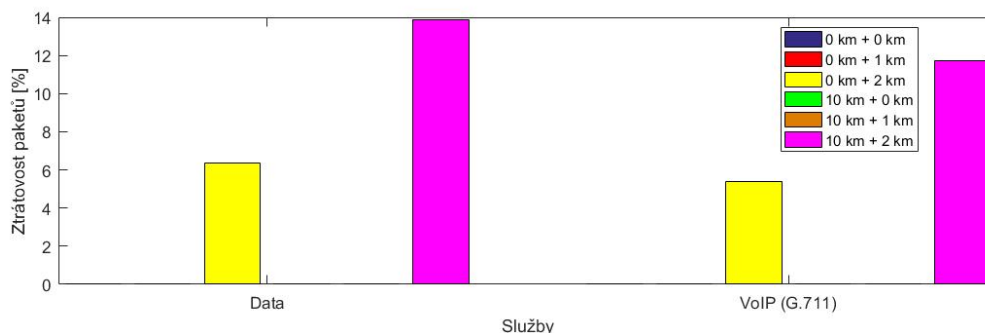
EtherSAM ADSL2+ - Jitter



Obrázek 43: Průměrný jitter, ADSL2+

Na obrázku 43 je zobrazen naměřený průměrný Jitter pro ADSL2+ profil. V případě služby Data se průměrný Jitter pohybuje pod hladinou 4 ms, až při délkách metalického vedení 2 km tato hodnota rostla na hranici 4 ms. V případě služby VoIP s použitým kodekem G.711 je naměřený průměrný Jitter o něco nižší než u služby Data. Hodnoty se pohybují na hranici 2,4 ms. V případě metalické trasy 2 km tato hodnota rostla ke 3 respektive ke 4 ms.

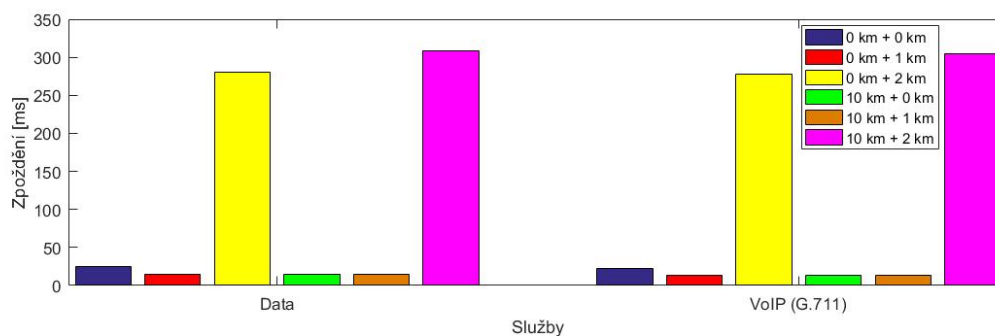
EtherSAM ADSL2+ - Ztrátovost



Obrázek 44: Ztrátovost paketů, ADSL2+

Co se týče ztrátovosti paketů (obrázek 44), tak byla naměřena pouze při změně délky metalického vedení na 2 km. Ztrátovost paketů je poměrně vysoká a dosahuje až 14% v případě služby Data a téměř 12% v případě služby VoIP. To může mít velký vliv na správnou činnost služeb při daných vzdálenostech.

EtherSAM ADSL2+ - Zpoždění



Obrázek 45: Zpoždění, ADSL2+

Na obrázku 45 je zobrazeno zpoždění, jehož hodnota se pohybovala v rozmezí 10 až 25 ms. Avšak v případě délky metalického vedení 2 km, byl naměřen velký nárůst až na hodnoty v rozmezí 275 až 310 ms u obou nastavených služeb. U služby Data nemá zpoždění velký vliv na činnost. Avšak u služby VoIP je to naopak. Vysoké zpoždění může mít negativní vliv na probíhající hlasovou službu.

8.2.5 Testování EtherSAM pro VDSL2

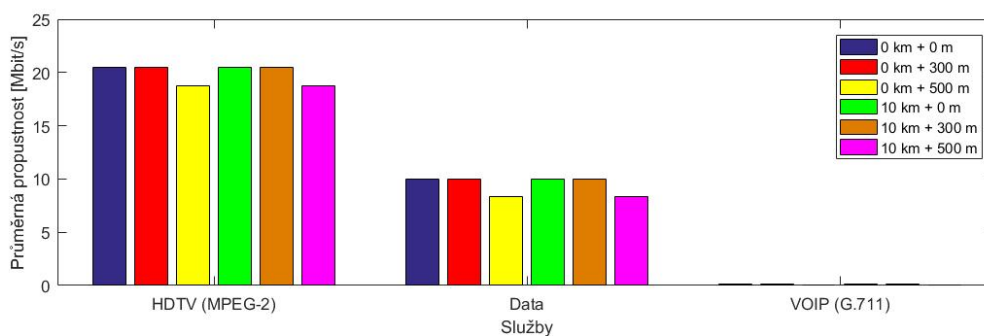
Pro ověření integrity sítě s VDSL2 pomocí testu EtherSAM, byla použita stejná topologie jako u měření ADSL2+. Rozdíl je pouze ve vzdálenostech metalické trasy, kdy pro VDSL2 byly použity trasy 0 m, 300 m a 500 m. Byl testován stejný profil na portu 10 se stejnými přenosovými

rychlostmi (45,44 Mbit/s pro upstream a 60 Mbit/s pro downstream). U VDSL2 byly nastaveny 2 profily EtherSAM testu s různou konfigurací služeb, zobrazeno v tabulce 15. První služba byla nastavena pro IPTV s různými kodeky (HDTV MPEG-2/MPEG4). Druhá služba byla nastavena pro Data a třetí služba pro VoIP s různými kodeky (G.711/G.723).

Tabulka 15: Nastavené parametry pro test EtherSAM ITU-T Y.1564 - VDSL2

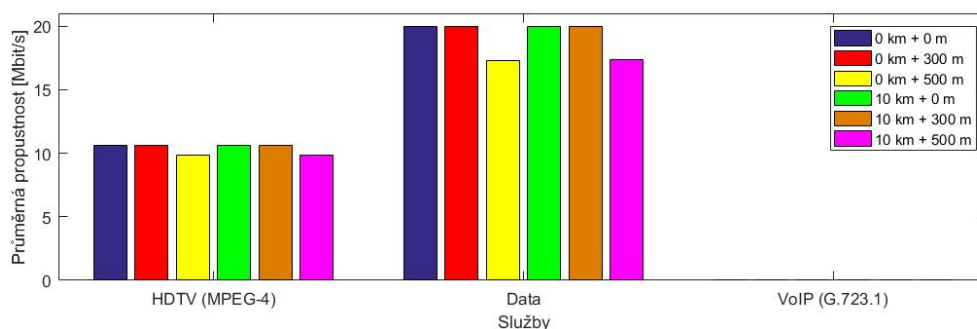
Služba	Typ služby	Profil služby	CIR [Mbit/s]	Velikost rámce [byte]
Profil 1				
1	IPTV	HDTV MPEG-2	20,4439	1374
2	Data	Data	1	Náhodná
3	VoIP	G.711	0,1264	138
Profil 2				
1	IPTV	HDTV MPEG4	10,5927	1374
2	Data	Data	20	Náhodná
3	VoIP	G.723	0,0272	82

EtherSAM VDSL2 - Propustnost



Obrázek 46: Průměrná propustnost u profilu 1, VDSL2

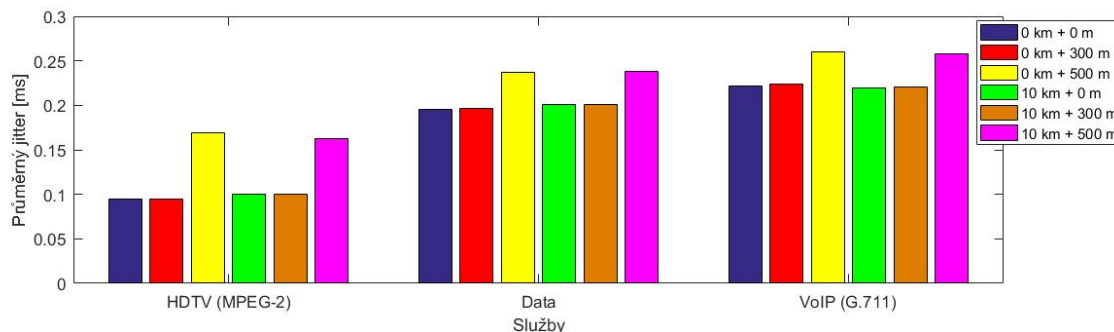
Na obrázku 46 je zobrazena průměrná propustnost pro nastavené služby u profilu 1. U služby IPTV, kde byl nastaven HDTV kodek MPEG-2, měl propustnost okolo 20 Mbit/s. Avšak s délkou metalické trasy 500 m, tato hodnota klesla o 1 Mbit/s. Podobně tomu bylo i u druhé služby pro Data, kde byla naměřena průměrná propustnost 10 Mbit/s a v případě metalické trasy 500 m, tato hodnota klesla o 1 Mbit/s. U služby VoIP je propustnost velice nízká a změna délky trasy neměla na tuto služby velký vliv.



Obrázek 47: Průměrná propustnost u profilu 2, VDSL2

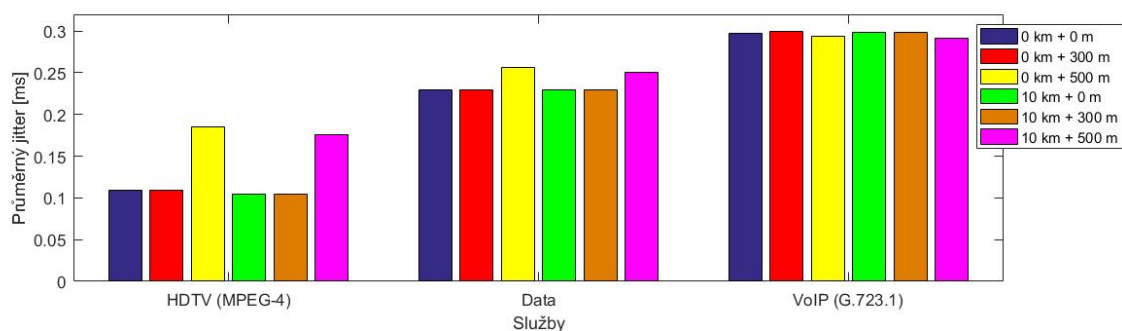
Na obrázku 47 je zobrazena průměrná propustnost pro nastavené služby u profilu 2. U služby IPTV, kde byl nastaven HDTV kodek MPEG-4, měl propustnost okolo 10 Mbit/s. Se změnou délky metalické trasy na 500 m, tato hodnota klesla o 0,7 Mbit/s. Pro druhou službu ,Data, byla naměřena průměrná propustnost 20 Mbit/s a v případě metalické trasy 500 m, tato hodnota klesla o 3 Mbit/s. Když to porovnáme se službou Data u prvního profilu, vidíme, že se zvyšující se šířkou pásma pro tuto službu je větší rozdíl při délce metalického vedení 0 m a 500 m. U služby VoIP je propustnost velice nízká a změna délky trasy neměla na tuto služby velký vliv. Jako v předešlém případě, i zde nemá délka optické trasy na výsledné hodnoty velký vliv.

EtherSAM VDSL2 - Jitter



Obrázek 48: Průměrná propustnost u profilu 1, VDSL2

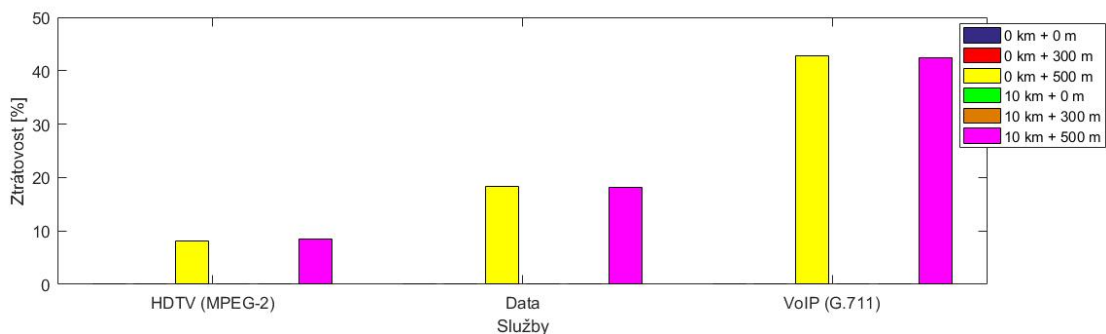
Průměrná hodnota Jitteru zobrazena na obrázku 48 je pod hranicí 0,3 ms u všech nastavených služeb. Nejvyšší průměrný jitter, neboli kolísání zpoždění byla naměřena u služby VoIP. Ale i tyto hodnoty jsou nízké a nemají na funkci služeb veliký vliv.



Obrázek 49: Průměrná propustnost u profilu 2, VDSL2

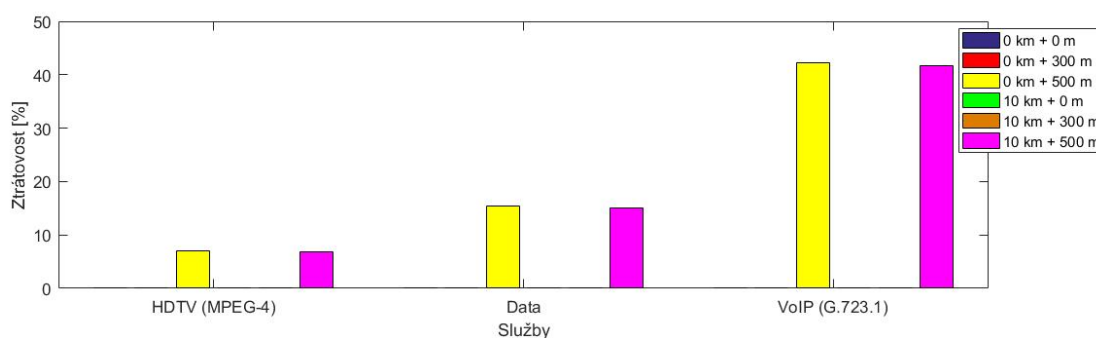
V případě průměrného Jitteru u nastavených služeb v druhém profilu (obrázek 49) je velmi podobný jako u profilu jedna. Opět byl nejvyšší průměrný jitter naměřen u služby VoIP, kde byl v případě kodeku G.723 o 7 setin ms vyšší, než v případě využitého kodeku G.711 u profilu jedna. Co se týče služby IPTV je v případě použití kodeků MPEG-2/MPEG-4 malý rozdíl a to platí i u služby Data, kde rozdíl v nastavení propustnosti neměl v tomto případě vliv na průměrný jitter.

EtherSAM VDSL2 - Ztrátovost



Obrázek 50: Ztrátovost u profilu 1, VDSL2

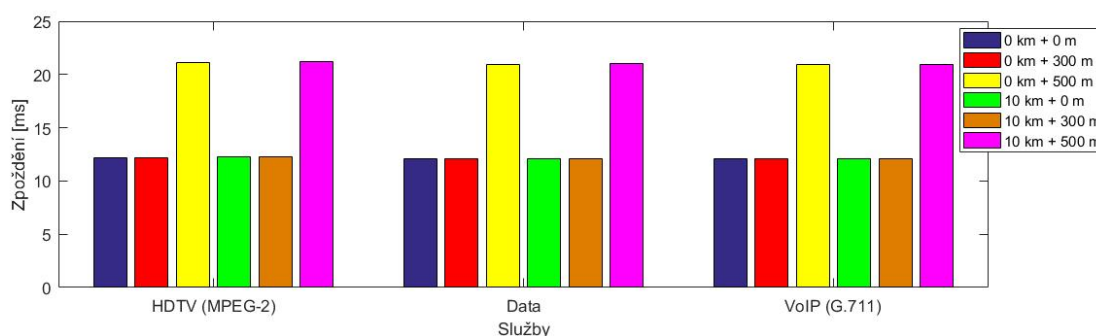
Na obrázku 50 je zobrazena ztrátovost paketů pro nastavené služby na profilu jedna. Na ztrátovost paketů nemá vliv změna délky optické trasy. Při nastavení metalického vedení na 0 a 300 m je ztrátovost paketů nulová. Avšak velký vliv má změna délky metalického vedení na 500 m. Nejvyšší ztrátovost byla naměřena u služby VoIP a to 42%. To má velký vliv na provoz služby. I v případě služeb Data a IPTV byla naměřena ztrátovost paketů 8 respektive 18%. I zde to může mít vliv na provoz služeb v dané topologii.



Obrázek 51: Ztrátovost u profilu 2, VDSL2

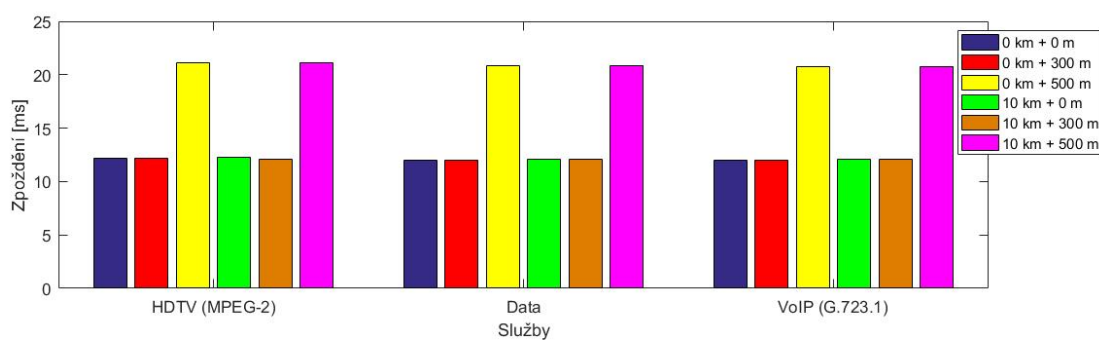
Ztrátovost paketů nastavených služeb na profilu 2 je zobrazena na obrázku 51. Výsledky byly podobné jako v předešlém případě. I v tomto případě při nastavení metalického vedení na 0 a 300 m je ztrátovost paketů nulová. U IPTV změna kodeku nemá velký vliv na změnu ztrátovosti paketů. I v případě služby Data, kde je nastavena propustnost dvojnásobná jako u profilu jedna, je ztrátovost paketů podobná. Dokonce je o něco nižší než u profilu jedna. Co se týče služby VoIP, tak i zde je ztrátovost nejvyšší z daných služeb. V dané topologii při délce metalického vedení 500 m má ztrátovost paketů negativní vliv na správný provoz všech služeb.

EtherSAM VDSL2 - Zpoždění



Obrázek 52: Zpoždění u profilu 1, VDSL2

Na obrázku 52 je zobrazeno zpoždění u profilu jedna. Hodnoty zpoždění jsou nízké a tak neovlivňují činnost nastavených služeb. Můžeme vidět, že při nastavení metalické trasy na 500 m je zpoždění téměř dvojnásobné. Ale i tak je stále tato hodnota nízká. U všech tří služeb se zpoždění pohybuje okolo 12 ms v případě metalického vedení 0 a 300 m. Při navýšení délky trasy metalického vedení na 500 m se hodnota zpoždění pohybuje okolo 21 ms.



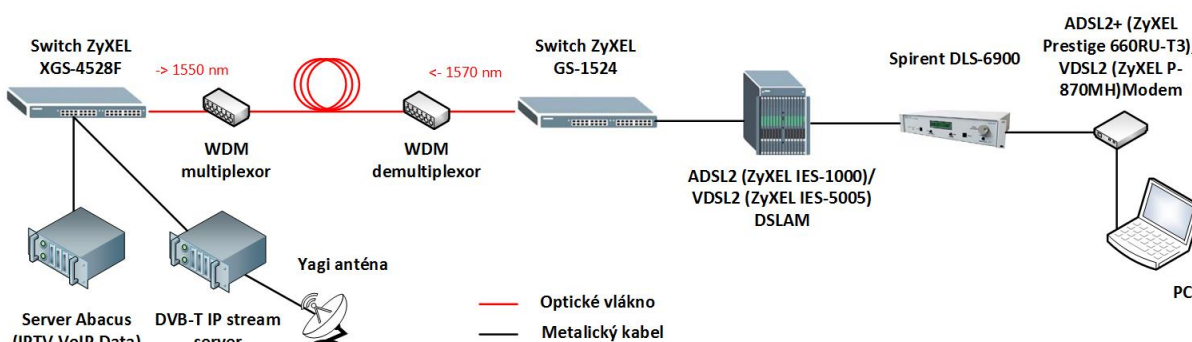
Obrázek 53: Zpoždění u profilu 2, VDSL2

V případě nastavení služeb na profilu dva (obrázek 53) jsou hodnoty téměř identické jako na profilu jedna. Proto i zde nemá zpoždění velký vliv na činnost nastavených služeb na dané topologii.

9 Měření kvality nasazené Triple play služby

Tato kapitola se zaměřuje na měření kvality služeb na vytvořené topologii. Měření bylo provedeno pomocí měřicího přístroje EXFO AXS-200/625. Dále bylo využito softwaru MSU Video Quality Measurement Tool pro měření IPTV. Pro měření kvality služby VoIP, neboli hlasových služeb bylo využito softwaru IxChariot, který byl nainstalovaný na virtuálním stroji. Pro testování služby Data bylo využito softwaru BwMeter, který slouží pro testování rychlosti při stahování a nahrávání.

Při měření byl využit server Abacus, na kterém se nachází virtuální stroje. Ty byly využity pro služby IPTV, VoIP a Data. bylo využito také IP-DVB streameru pro streamování pozemního digitálního vysílání. Topologie sítě je zobrazena na obrázku 54.



Obrázek 54: Topologie sítě

9.1 IPTV

Služba IPTV byla testovaná při unicastovém a multicastovém provozu. Testování probíhalo pomocí softwaru MSU VQMT. Multicastový provoz byl navíc proměřen přístrojem AXS-200/625, který umožňuje testování multicastového provozu, nikoli unicastového. V tabulce 16 jsou uvedeny parametry zkoumaných vzorků videa.

Tabulka 16: Vzorky videí pro testování IPTV

Vzorek	Formát	Rámce za sekundu	Rozlišení	Kodek
576p	MPEG	25	720x576	MPEG-2
1080p	MPEG	29	1920x1080	MPEG-2
1080p	MKV	25	1920x1080	H264 (MPEG-4)
720p	AVI	25	1280x720	H264 (MPEG-4)
DVB-T	MPEG	25	720x576	MPEG-2

9.1.1 Měření IPTV pomocí EXFO AXS 200/625

V tomto měření byli analyzované vzorky videí uvedené v tabulce 16 při multicastovém provozu. Byly měřeny parametry přenosové rychlosti videa, ztrátovosti paketů a jitter, neboli kolísání zpoždění. V případě ADSL2+ nebylo možné provádět měření pro vzorek videa MPEG-2 1080p, jelikož potřebuje vyšší přenosovou rychlost než nám může ADSL2+ poskytnout. Měření vzorků videí probíhalo pět minut a výsledná data jsou analyzovaná níže.

Měření přenosové rychlosti vybraných vzorků

V tabulce 17 můžeme vidět průměrnou rychlost videí u ADSL2+ s různými kombinacemi délek optické trasy (0 km a 10 km) a metalické trasy (0 km, 1 km, 2 km a 3 km). U ADSL2+ neměla změna délky tras významný vliv. Nejvyšší přenosová rychlost byla naměřena u vzorku videí DVB-T a MPEG-2 (576p).

Tabulka 17: Průměrná přenosová rychlost vybraných videí u ADSL2+

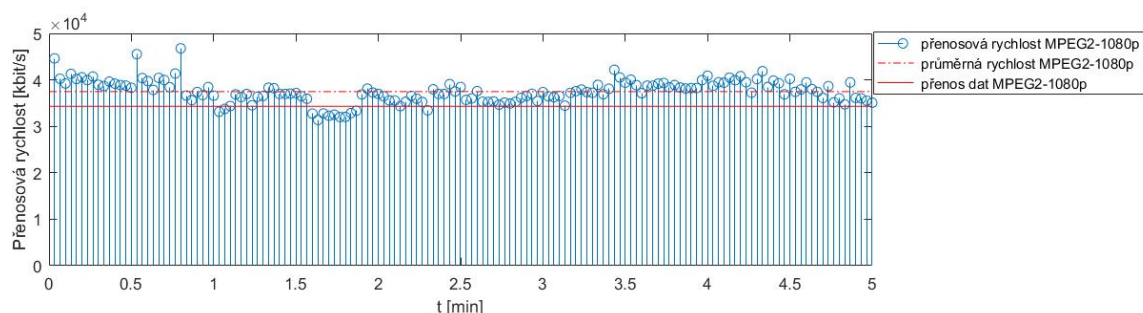
Délka trasy	Průměrná přenosová rychlost videa [kbit/s]			
	MPEG-2 (576p)	MPEG-4 (720p)	MPEG-4 (1080p)	DVB-T (576p)
0 km + 0 km	3993,627	1858,58	2773,551	4257,737
0 km + 1 km	4088,705	1807,288	2810,412	4960,81
0 km + 2 km	4088,705	1933,541	2835,167	5640,83
0 km + 3 km	4000,464	1911,818	2858,307	5044,458
10 km + 0 km	4002,459	1658,385	2837,623	5521,358
10 km + 1 km	4008,28	1713,295	2816,006	5172,588
10 km + 2 km	4161,93	1814,654	2818,422	5286,338
10 km + 3 km	4186,863	1854,663	2817,184	4539,221

V tabulce 18 jsou zobrazeny průměrné rychlosti videí u VDSL2+ s různými kombinacemi délek optické trasy (0 km a 10 km) a metalické trasy (0 km, 0,5 km, 1 km, 2 km a 2,5 km). V případě vzorku videa 1080p MPEG-2 bylo měřeno do délky metalického vedení 0,7 km. A to z důvodu, že tento vzorek potřebuje vyšší přenosové rychlosti než ostatní vzorky. A už při vzdálenosti 0,7 km bylo naměřena degradace kvality daného vzorku videa, kdy byla omezena přenosová rychlost videa z 37 Mbit/s na 32 Mbit/s.

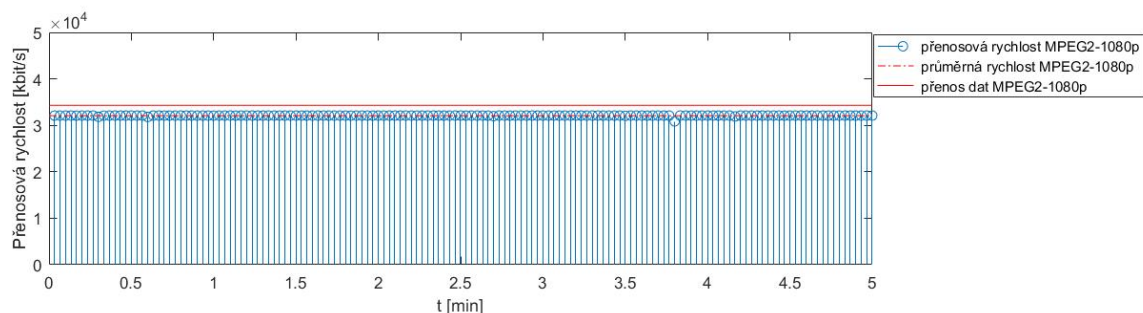
Tabulka 18: Průměrná přenosová rychlost vybraných videí u VDSL2

Délka trasy	Průměrná přenosová rychlost videa [kbit/s]				
	MPEG-2 (576p)	MPEG-2 (1080p)	MPEG-4 (720p)	MPEG-4 (1080p)	DVB-T (576p)
0 km + 0 km	3994,125	37460,86	1790,503	2750,883	4488,365
0 km + 0,5 km	4048	37496,46	1813,915	2328,928	4293,922
0 km + 0,7 km	-	32083,83	-	-	-
0 km + 1 km	3989,132	-	1640,645	2845,147	4813,305
0 km + 2 km	3958,895	-	1686,765	2824,105	3557,813
0 km + 2,5 km	3142,154	-	1654,929	2539,692	3155,557
10 km + 0 km	4142,314	36828,25	1677,846	2837,444	4174,849
10 km + 0,5 km	3992,099	36971,41	1846,675	2791,601	4344,563
10 km + 0,7 km	-	31903,24	-	-	-
10 km + 1 km	4160,695	-	1849,617	2767,007	4337,974
10 km + 2 km	3907,922	-	1641,98	3143,172	3865,103
10 km + 2,5 km	3182,046	-	1598,686	2738,712	1759,831

Na obrázcích 55 a 56 lze vidět porovnání vzorku videa MPEG-2 1080p při změně metalické trasy z 0 na 0,7 km u VDSL2. U tohoto vzorku videa byl naměřen největší pokles přenosové rychlosti při přidání metalické trasy. Červená linka znázorňuje potřebnou šířku pásma pro přenos videa. Čárkovaná červená linka poté znázorňuje naměřenou průměrnou rychlost videa. Při délce metalické trasy 0,7 km můžeme vidět, že potřebná šířka pásma pro přenos videa je vyšší než přenosová rychlost naměřeného vzorku. To má za následek trhání videa a téměř sto procentní ztrátovost paketů. Porovnání ostatních vzorků videí je zobrazeno v příloze.



Obrázek 55: Přenosová rychlost videa MPEG-2 1080p při optické trase 0 km a 0 km metalické trasy u VDSL2



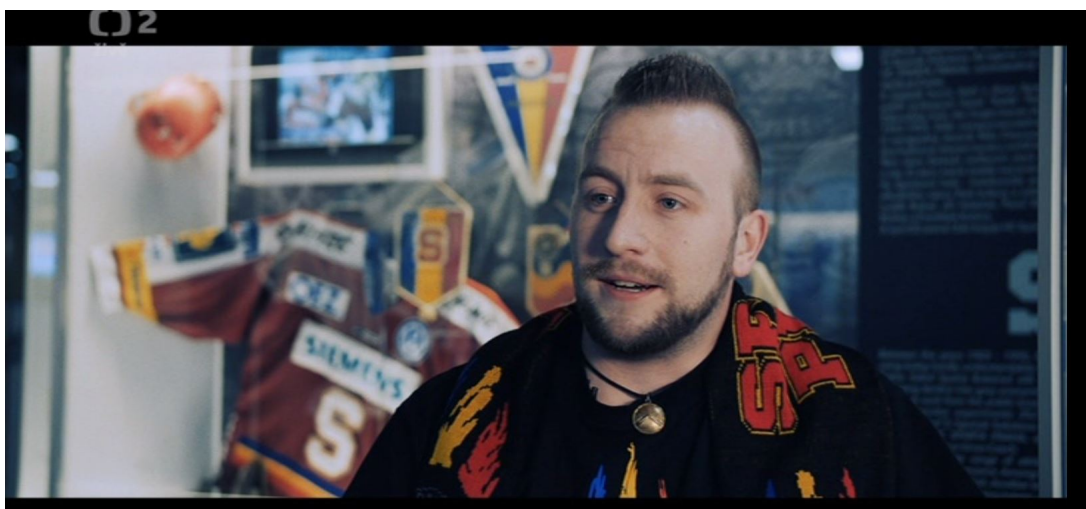
Obrázek 56: Přenosová rychlost videa MPEG-2 1080p při optické trase 0 km a 0,7 km metalické trasy u VDSL2

Měření ztrátovosti paketů vybraných vzorků

Ztrátovost paketů v případě měření na vybraném profilu ADSL2+ je zobrazena v tabulce 19. Byla naměřena poměrně vysoká ztrátovost paketů u vzorku videa MPEG-2 576p. Avšak na nahraném pěti minutovém vzorku videa není vidět vliv ztrátovosti paketů a obraz je plynulý. To stejný je i v případě vzorků videí MPEG-4 720p/1080p, kde ztrátovost paketů nemá vliv na kvalitu obrazu u nahraných vzorcích videí. V případě pozemního vysílání DVB-T (576p) byla naměřena při délce metalického vedení 3 km, ztrátovost 66% respektive 41,2%. V tomto případě měla ztrátovost negativní vliv na vzorek videa. Rozdíl ve vzorcích lze vidět na obrázcích 57 a 58, kde první je vzorek videa při optické trase 0 km a metalické trase 0 km a druhý obrázek je vzorek při optické trase 0 km a metalické trase 3 km. Na vzorcích videí MPEG-2 576p, MPEG4 702p/1080p nelze vidět rozdíl a proto zde nejsou uvedeny obrázky z videí.

Tabulka 19: Ztrátovost paketů vybraných vzorků videí u ADSL2+

Délka trasy	Ztrátovost paketů [%]			
	MPEG-2 (576p)	MPEG-4 (720p)	MPEG-4 (1080p)	DVB-T (576p)
0 km + 0 km	20,6667	5,3333	7,3333	6
0 km + 1 km	17,3333	7,3333	7,3333	1,9608
0 km + 2 km	13,3333	8,6667	11,3333	7,333
0 km + 3 km	21,3333	7,3333	18	66
10 km + 0 km	14	4	8,6667	8
10 km + 1 km	12,6667	10	14,6667	6,6667
10 km + 2 km	13,3333	11,3333	18	7,1895
10 km + 3 km	18,6667	9,3333	14,6667	41,1765



Obrázek 57: Snímek vzorku videa DVB-T při optické trase 0 km a metalické trase 0 km, ADSL2+



Obrázek 58: Snímek vzorku videa DVB-T při optické trase 0 km a metalické trase 3 km, ADSL2+

V tabulce 20 je zobrazena ztrátovost paketů na vybraném profilu VDSL2. V porovnání s ADSL2+ profilem jsou naměřené hodnoty ztrátovosti paketů menší, do určité vzdálenosti. Samozřejmě je to dáno vyšší propustností u VDSL2. V případě vzorku videa MPEG-2 576p má video nízkou ztrátovost paketů do vzdálenosti 2 km metalické trasy a na zobrazení videa neměla vliv. Při navýšení metalické trasy na 2,5 km vzrostla ztrátovost paketů na 90%. To mělo negativní vliv na vzorek videa. U vzorku videa MPEG-2 1080p byla ztrátovost paketů téměř nulová do 0,5 km metalické trasy. Při navýšení trasy na 0,7 km už byla ztrátovost paketů 100%. Je to dáno tím, že MPEG-2 1080p potřebuje minimální rychlost kolem 34 Mbit/s. Avšak naměřená propustnost profilu VDSL2 na této délce trasy byla naměřena 31,5 Mbit/s. Proto je ztrátovost paketů 100% u tohoto vzorku videa při vzdálenosti 0,7 km. U vzorku videa MPEG-4 720p neměla změna vzdálenosti metalické trasy velký vliv na ztrátovost paketů. U vzorku videa MPEG-4 1080p měla metalická trasa vliv až v případě 2,5 km, kde byla naměřena ztrátovost paketů 20% a měla už menší negativní vliv. Na ostatních délkách metalické trasy byla ztrátovost paketů minimální. V případě pozemního vysílání DVB-T byla naměřena vyšší ztrátovost paketů až při vzdálenosti metalické trasy 2 a 2,5 km. Při 2 km trase byla ztrátovost přes 55%. A v určitých částech videa to mělo výrazný vliv (trhání obrazu). Co se týče 2,5 km metalické trasy, tak byla ztrátovost vyšší jak 90%. U videa se to projevilo tak, že obraz se trhal a nastaly výpadky zvuku. Na obrázcích 59 a 60 je možné vidět rozdíl mezi konkrétními snímky vzorku videa MPEG-2 1080, kde byl naměřena největší ztrátovost po přidání metalické trasy. První snímek je ze vzorku videa při optické trase 0 km a metalické trase 0 km a druhý snímek je ze vzorku při optické trase 0 km a metalické trase 0,7 km.

Tabulka 20: Ztrátovost paketů vybraných vzorků videí u VDSL2

Délka trasy	Ztrátovost paketů [%]				
	MPEG-2 (576p)	MPEG-2 (1080p)	MPEG-4 (720p)	MPEG-4 (1080p)	DVB-T (576p)
0 km + 0 km	1,3333	0	1,3333	1,3333	0,6667
0 km + 0,5 km	0,6667	0,6667	0,6667	0,6667	1,3333
0 km + 0,7 km	-	100	-	-	-
0 km + 1 km	1,3333	-	2	0,6667	1,3333
0 km + 2 km	4,6667	-	1,3333	0	55,3333
0 km + 2,5 km	89,3333	-	0,6667	20,6667	90,6667
10 km + 0 km	0,6667	0,6667	0	1,3333	1,3333
10 km + 0,5 km	0,6667	0	0,6667	1,3333	0
10 km + 0,7 km	-	100	-	-	-
10 km + 1 km	2,6667	-	0,6667	3,3333	0
10 km + 2 km	1,3333	-	0,6667	2,6667	56,6667
10 km + 2,5 km	90,6667	-	0,6667	17,3333	96,6667



Obrázek 59: Konkrétní snímek vzorku videa DVB-T při optické trase 0 km a metalické trase 0 km, VDSL2+

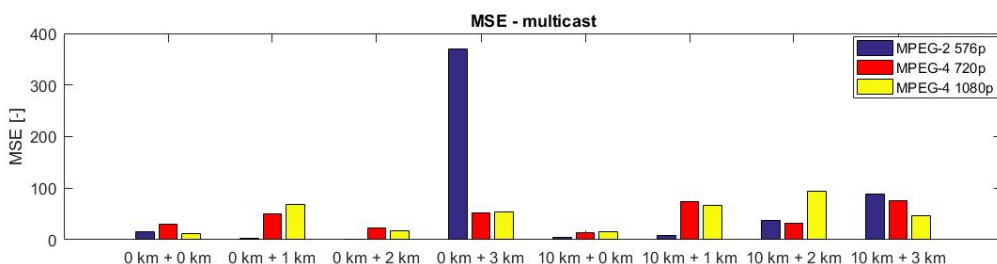


Obrázek 60: Konkrétní snímek vzorku videa DVB-T při optické trase 0 km a metalické trase 0,7 km, VDSL2+

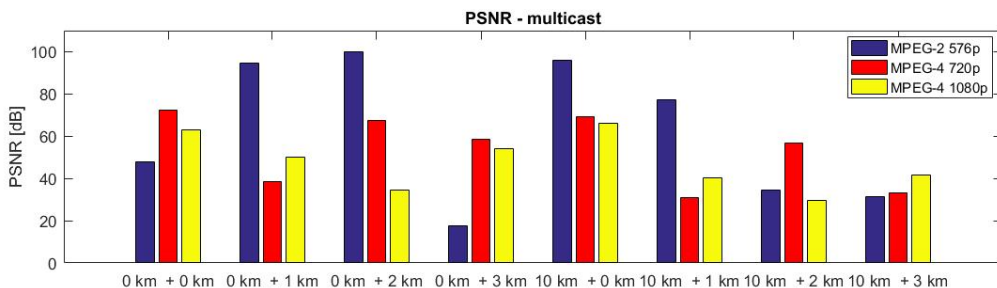
9.1.2 Měření IPTV pomocí MSU Video Quality Measurement Tool

Další částí testování IPTV bylo pomocí softwaru MSU Video Quality Measurement Tool. Byly testovány stejné vzorky videa jako v předešlém měření. Testování probíhá tak, že se nahraje streamované video a následně se porovnává s videem originálním. Jediným problémem je to, že videa musí mít stejný začátek, tak aby se mohl porovnávat stejný frame. Pro testování byly nahrány pětiminutové videa a následně porovnávána s originálním videem. V tomto testu nemohlo být testováno video z pozemního vysílání, jelikož nebylo možné srovnávat s originálním videem. Byl testován unicastový i multicastový provoz. U vzorků probíhal test pomocí objektivních metod PSNR, MSE a SSIM.

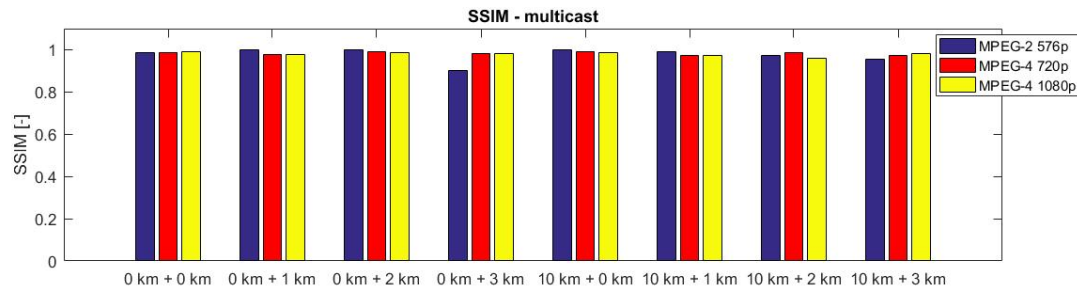
ADSL2+



Obrázek 61: Hodnoty parametru MSE u multicastového provozu, ADSL2+

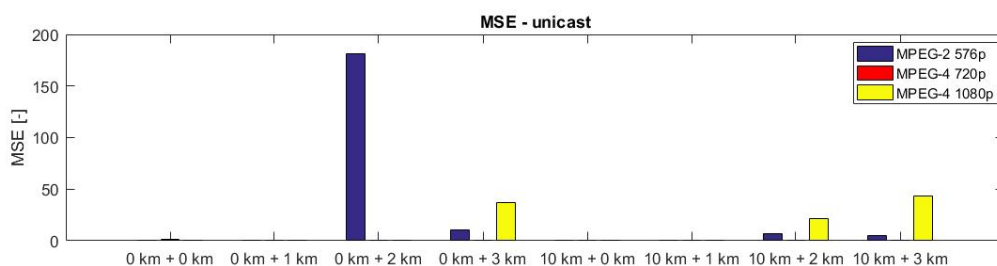


Obrázek 62: Hodnoty parametru PSNR u multicastového provozu, ADSL2+

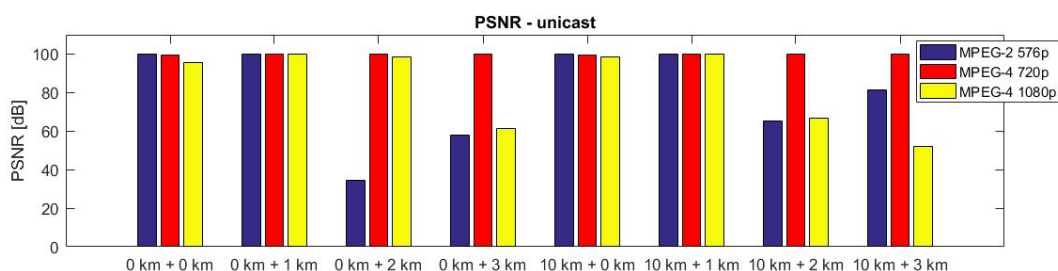


Obrázek 63: Hodnoty parametru SSIM u multicastového provozu, ADSL2+

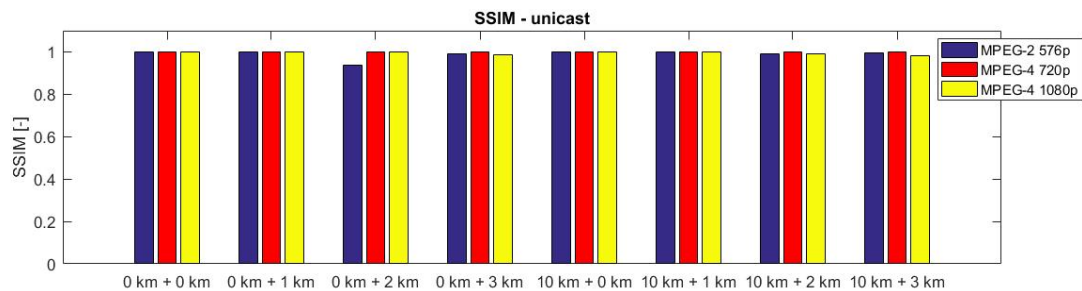
Na obrázku 61 až 63 jsou zobrazeny hodnoty parametrů MSE, SSIM a PSNR při multicas-
tovém provozu. Na měření neměla vliv změna optické trasy z 0 km na 10 km, ale spíše změna
metalické trasy. Objektivní metoda MSE vyjadřuje střední kvadratickou odchylku původního
signálu od zachyceného signálu. Můžeme vidět, že největší odchylka byla naměřena u vzorku
videa MPEG-2 576p. Kdy při optické trase 0 km a metalické trase 3 km je rovna hodnotě 370,3.
U ostatních vzorků videa jsem neměřil velký vliv změny trasy na tyto hodnoty. Jen v jednom
případě byla odchylka téměř nulová a to u stejného vzorku MPEG-2 576p při optické trase 0
km a metalické trase 2 km. Parametr PSNR představuje poměr mezi nejvyšší hodnotou signálu
vůči parametru MSE. Udává se v dB. Můžeme vidět, že nejvyšší hodnota PSNR byla naměřena
u vzorku MPEG-2 576p. Zároveň u tohoto vzorku videa byla naměřena taky nejnižší hodnota
PSNR a to v případě optické trasy 0km a metalické trasy 3 km. Tato hodnota koresponduje s
hodnotou MSE, kde v tomto případě byla taky nejhorší. Čím vyšší hodnota MSE tím se vzorek
více liší od originálního videa. U parametru PSNR je vzorek shodný s originálním videem pokus
je tato hodnota 100 db. Čím nižší hodnota PSNR tím si jsou testované vzorky méně podobné.
SSIM parametr zohledňuje lidský vizuální systém. Hodnota 1 znamená shodu porovnávaných
vzorků. Hodnota 0 znamená nulový vztah k originálnímu obrázku. Nejnižší hodnota parametru
SSIM byla opět naměřena u vzorku videa MPEG-2 576p při 0 km optické trase a 3 km metalické
trase. V ostatních případech se hodnota SSIM pohybovala v hodnotách od 0,95 do 1.



Obrázek 64: Hodnoty parametru MSE u unicastového provozu, ADSL2+

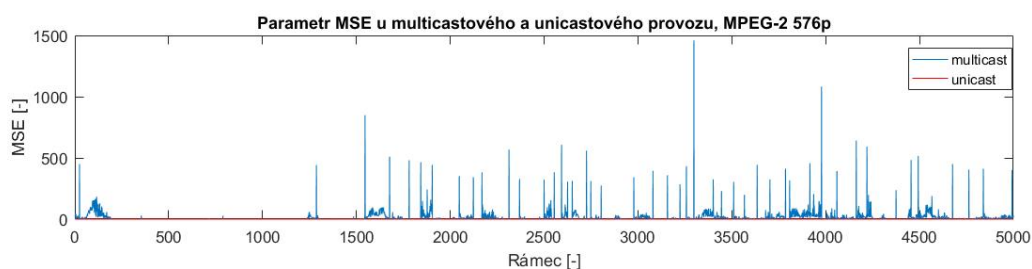


Obrázek 65: Hodnoty parametru PSNR u unicastového provozu, ADSL2+

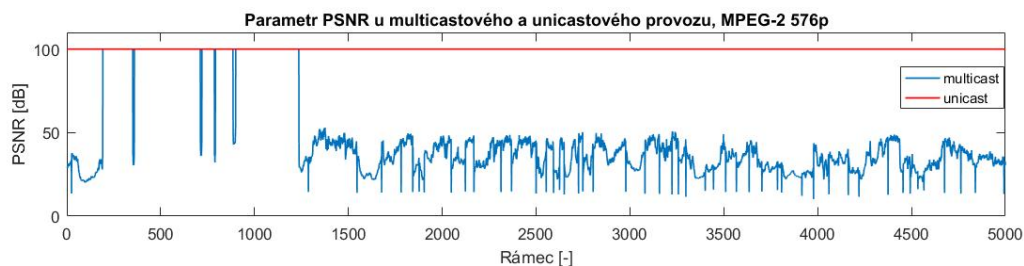


Obrázek 66: Hodnoty parametru SSIM u unicastového provozu, ADSL2+

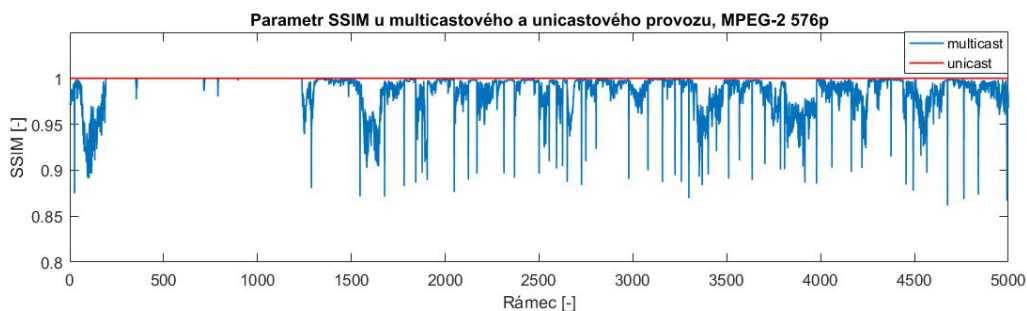
Na obrázcích 64 až 66 jsou zobrazeny hodnoty parametrů MSE, SSIM a PSNR při unicastovém provozu. I v tomto případě byly nejhorší parametry naměřeny u vzorku videa MPEG-2 576p. Tentokrát ale u kombinace tras 0 km optické trasy a 2 km metalické trasy, kde byla naměřena hodnota MSE 370,3. To se samozřejmě projevuje i parametru PSNR a SSIM. Kdy hodnota parametru PSNR klesla pod 40 dB a hodnota parametru SSIM klesla na hodnotu 0,94. U vzorku videa MPEG-4 720p byly naměřeny nejlepší hodnoty. Je to dané tím, že tento vzorek potřebuje nižší šířku pásma než ostatní vzorky videí. Parametr MSE byl u tohoto vzorku téměř nulový. To se projevuje taky na parametru PSNR, kdy hodnoty nespádli pod 99 dB a u parametru SSIM se hodnoty pohybovaly od 0,99 do 1. U vzorku MPEG-4 1080p už měla vliv změna délky metalické trasy. Kdy při délce trasy 10 km optické trasy a metalické trasy 3 km byla hodnota parametru MSE 42,9. Hodnota parametru PSNR spadla na hodnotu 52,2 a hodnota parametru SSIM byla 0,98. Na obrázcích 67, 68 a 69 jsou zobrazeny rozdíly těchto parametrů u vzorku videa MPEG-2 576p při optické trase 0 km a metalické trase 0 km. Zde jsou vidět horší parametry u multicastového provozu v porovnání s unicastovým provozem. Avšak na kvalitu nahraného vzorku videa to nemělo výrazný vliv a nelze spatřit rozdíly mezi nahraným vzorkem a originálním videem.



Obrázek 67: Hodnoty parametru MSE při délce optické trasy 0 km a metalické trasy 0 km



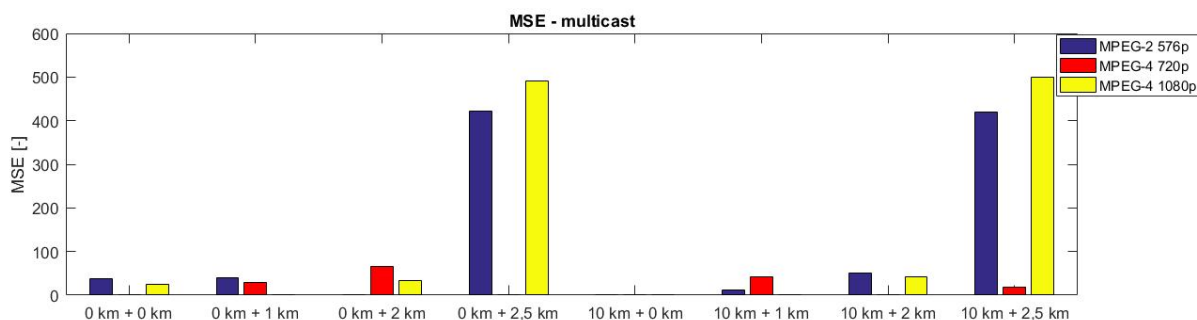
Obrázek 68: Hodnoty parametru PSNR při délce optické trasy 0 km a metalické trasy 0 km



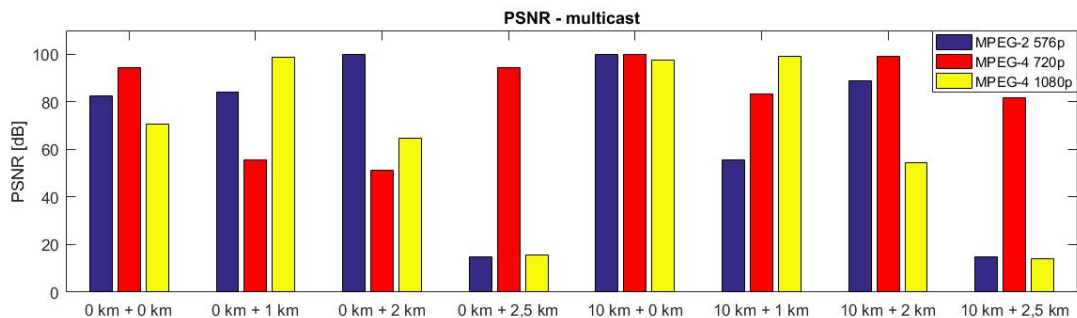
Obrázek 69: Hodnoty parametru SSIM při délce optické trasy 0 km a metalické trasy 0 km

VDSL2

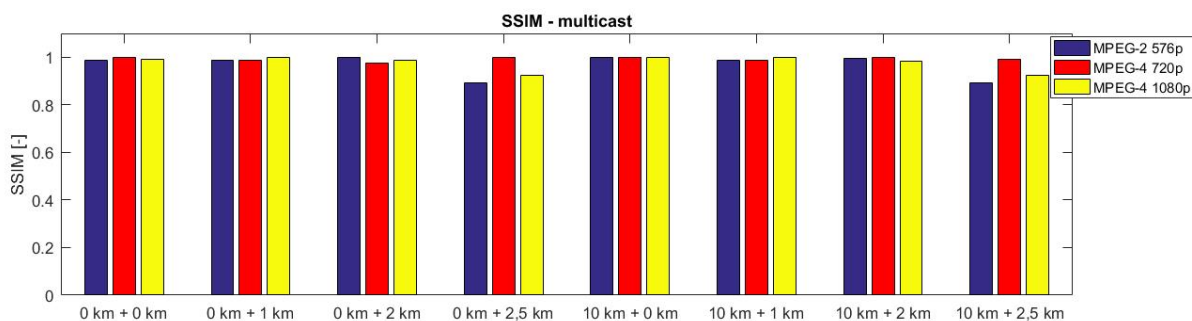
U VDSL2 profilu bylo proti ADSL2+ opět přidán vzorek videa MPEG-2 1080p, který byl proměřen pro metalické trasy 0 km, 0,5 km a 0,7 km, a proto jsou hodnoty tohoto videa zobrazeny zvlášť na jednotlivých grafech. Ostatní vzorky videa byla proměřena pro trasy 0 km, 0,5 km, 1 km, 2 km a 2,5 km. Pro přehlednost nejsou v grafech zaznamenány výsledky se vzdáleností 0,5 km, ale je možné je vidět v tabulce v příloze (v části Tabulky). A samozřejmě pro optické trasy 0 km a 10 km.



Obrázek 70: Hodnoty parametru MSE u multicastového provozu, VDSL2

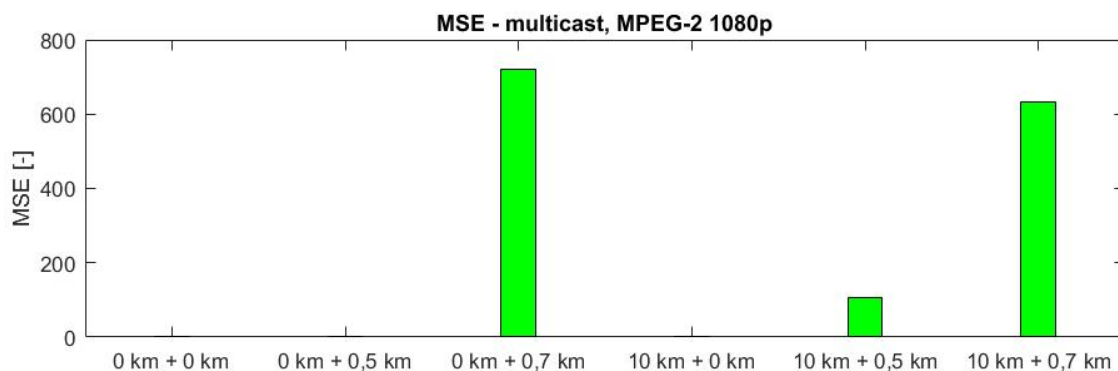


Obrázek 71: Hodnoty parametru PSNR u multicastového provozu, VDSL2

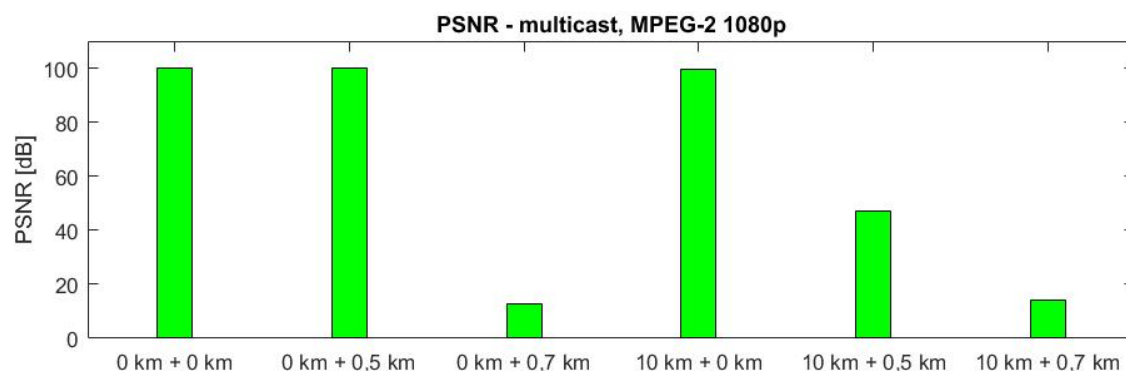


Obrázek 72: Hodnoty parametru SSIM u multicastového provozu, VDSL2

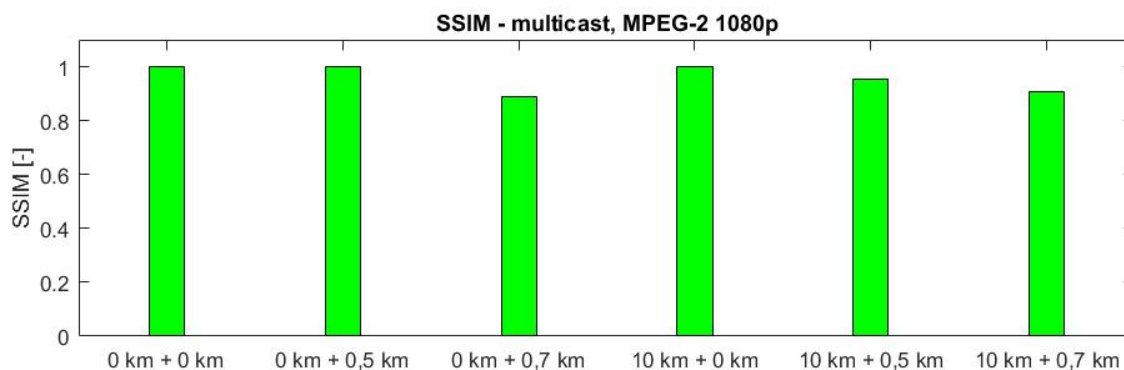
Na obrázcích 70 až 72 jsou zobrazeny výsledné hodnoty parametrů MSE, SSIM, PSNR při multicastovém provozu u profilu VDSL2. Na měření opět neměla vliv změna optické trasy z 0 km na 10 km. Největší vliv změny metalické trasy měl na vzorky videí MPEG-2 576p, MPEG-2 1080p a MPEG-4 1080p. Vzorek videa MPEG-2 576p byl nejvíce ovlivněn až při délce metalické trasy 2,5 km, kde se hodnota MSE pohybovala okolo 420. Na parametru PSNR se to projevilo klesnutím na hodnoty 15 dB a parametr SSIM se pohyboval kolem hodnot 0,89. Tento vzorek videa a vzorek videa MPEG-2 1080p vykazovaly nejhorší výsledky při navyšování délek metalické trasy. Podobně na tom je vzorek MPEG-4 1080p, který byl také ovlivněn až na délce trasy 2,5 km. U tohoto vzorku videa, po změně délky metalické trasy na 2,5 km, se hodnota parametru MSE pohybovala okolo 500. Hodnota parametru PSNR spadla ze 100 db spadla na hodnotu okolo 15 dB a hodnota SSIM se pohybovala kolem hodnot 0,925. Na vzorek videa MPEG-4 720p neměla změna metalické trasy velký vliv na měřené parametry a vykazovalo nejlepší hodnoty.



Obrázek 73: Hodnoty parametru MSE u multicastového provozu, VDSL2 - MPEG-2 1080p



Obrázek 74: Hodnoty parametru PSNR u multicastového provozu, VDSL2 - MPEG-2 1080p



Obrázek 75: Hodnoty parametru SSIM u multicastového provozu, VDSL2 - MPEG-2 1080p

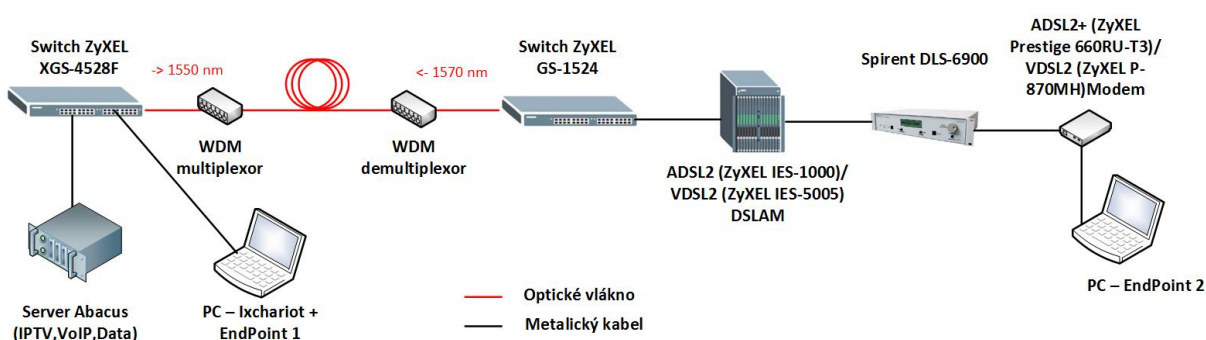
Na obrázcích 73 až 75 jsou zobrazeny dané parametry pro vzorek videa MPEG-2 1080p. Kvůli větší šířce pásma, kterou tento vzorek potřebuje, tak bylo provedeno měření jen do vzdálenosti 0,7 km. U tohoto vzorku můžeme vidět, že se hodnota parametru MSE začala měnit až při vzdálenosti 0,7 km metalické trasy, kdy dosahovala hodnot přes 600. Při této délce trasy byla kvalita videa už hodně degradována. Hodnota parametru PSNR klesla na hodnotu kolem 12 dB a hodnota SSIM se pohybovala okolo hodnot 0,9. Změna optické trasy neměla na měření velký vliv. V porovnání s ostatními vzorky videa samozřejmě dopadlo toto měření nejhůře. Pro

streamování videa je lepší využít kodek MPEG-4 než MPEG-2.

Hodnoty parametrů MSE, SSIM a PSNR při unicastovém provozu dopadli podobně jako u multicastového provozu. Proto zde nejsou grafy zobrazeny, ale můžeme je vidět v příloze v části Grafy.

9.2 VoIP

Pro hodnocení kvality hlasových služeb bylo využito programu IxChariot, který byl nainstalovaný na virtuální stroj. Pro testování se musí nastavit 2 endpointy. Proto byly využity dva počítače. Jeden počítač byl na straně serveru a druhý byl napojený na straně modemu. Topologie zapojení je zobrazena na obrázku 76.



Obrázek 76: Schéma zapojení při měření hlasových služeb

Přehled použitých kodeků je zobrazeno v tabulce 21

Tabulka 21: Použité kodeky pro testování

Kodek	Šířka pásma [kbit/s]
G.711 μ -law	64
G.723.1 ACELP	5,3
G.729	8

Měření bylo nejprve prováděno pro změny délek optické i metalické trasy na vybraných profilech ADSL2+ a VDSL2. Šířka pásma jednotlivých kodeků je tak malá, že výsledky jsou stejné a změna trasy nemá vliv na kvalitu hovoru. Proto poté bylo prováděno testování při provozu pozemního vysílání DVB-T, kde při navyšování metalické trasy jde vidět negativní vliv na kvalitu hlasových služeb. Byly sledovány hodnoty parametrů MOS a R-faktoru.

Tabulka 22: Naměřené hodnoty MOS a R-faktoru u profilu ADSL2+

Typ kodeku	G.711 μ -law		G.723.1 ACELP		G.729	
Kombinace délky tras (optická + metalická)	MOS	R-Faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0 km + 0 km	4,36	91,03	3,64	70,99	4,03	80,01
0 km + 1 km	4,37	91,36	3,64	70,98	4,03	80,06
0 km + 2 km	4,37	91,18	3,63	70,79	4,02	79,87
0 km + 3 km	4,14	85,82	3,62	70,44	3,98	78,88
10 km + 0km	4,36	90,95	3,64	70,99	4,03	80,07
10 km + 1 km	4,37	91,35	3,64	70,98	4,03	80,06
10 km + 2 km	4,37	91,17	3,63	70,78	4,02	79,89
10 km + 3 km	4,04	83,3	3,51	68,4	3,93	77,9

V tabulce 22 jsou zobrazeny naměřené hodnoty MOS a R-faktoru pro vybrané kodeky u ADSL2+ profilu. Jak lze vidět, zhoršení nastává až při délce metalické trasy 3 km. Avšak kvalita hlasových služeb byla i tak vynikající. Měření nebylo prováděno pro větší vzdálenosti, jelikož by nemělo smysl provádět měření při streamování pozemního vysílání DVB-T, kde by stream ani neběžel.

Tabulka 23: Naměřené hodnoty MOS a R-faktoru u profilu VDSL2

Typ kodeku	G.711 μ -law		G.723.1 ACELP		G.729	
Kombinace délky tras (optická + metalická)	MOS	R-Faktor	MOS	R-faktor	MOS	R-faktor
0 km + 0 km	4,37	91,35	3,64	70,97	4,03	80,04
0 km + 1 km	4,37	91,26	3,64	70,87	4,02	79,96
0 km + 2 km	4,37	91,11	3,14	3,64	3,85	76,35
0 km + 2,5 km	1	0	1,22	9,07	1,44	14,43
10 km + 0 km	4,37	91,35	3,64	70,97	4,03	80,05
10 km + 1 km	4,37	91,26	3,64	70,88	4,02	79,96
10 km + 2 km	4,28	88,81	2,89	55,12	3,94	78,05
10 km + 2,5 km	2,05	28,49	1,84	27,64	1,39	11,41

V tabulce 23 jsou zobrazeny naměřené hodnoty MOS a R-faktoru pro VDSL2 profil. Zde měla veliký vliv změna u metalické trasy na 2,5 km. Kde při vysílání DVB-T byly hlasové služby výrazně ovlivněny tak ,že byly nevyhovující a nepříjemné pro hovor. V ostatních případech nebyl naměřen výrazný vliv změna délky trasy na hlasové služby. Při nižších délkách metalické trasy není vidět výrazný vliv na hlasové služby.

9.3 Data

Pro službu data byla využit virtuální stroj na serveru Abacus. U koncového uživatele pak stačilo zadat IP adresu virtuálního serveru do vyhledávače, kde se načetla stránka serveru. Zde bylo možné stahovat i nahrávat soubory. Pro měření bylo využito softwaru BWMeter, který umožňuje

zaznamenávat přenosové rychlosti v obou směrech. Pro dosažení maximální rychlosti downloadu byla potřeba stahovat více souborů zároveň, protože při stahování jednoho souboru nebylo možné dosáhnout maximální rychlosti.

Tabulka 24: Naměřené přenosové rychlosti u ADSL2+

Kombinace délky tras (optická + metalická)	upload [kbit/s]	download [kbit/s]
0 km + 0 km	153,886	2710,5
0 km + 1 km	152,545	2308,5
0 km + 2 km	132,638	1721,825
0 km + 3 km	95,631	682,45
10 km + 0 km	152,383	2690,35
10 km + 1 km	156,426	2545,125
10 km + 2 km	120,212	1728,725
10 km + 3 km	95,699	683,05

V tabulce 24 jsou zobrazeny naměřené rychlosti pro ADSL2+ profil. Můžeme vidět, že u uploadu klesla přenosová rychlost až při 2 km metalické trasy. U downloadu byla naměřena nejvyšší přenosová rychlost 2710,5 kbit/s. S přidáváním vzdálenosti metalické trasy tato rychlost rychle klesala, kdy na optické trase 0 km a metalické trase 3 km byla naměřena přenosová rychlost 682,45 kbit/s. Změna optické trasy na 10 km měla na měření minimální vliv.

Tabulka 25: Naměřené přenosové rychlosti u VDSL2

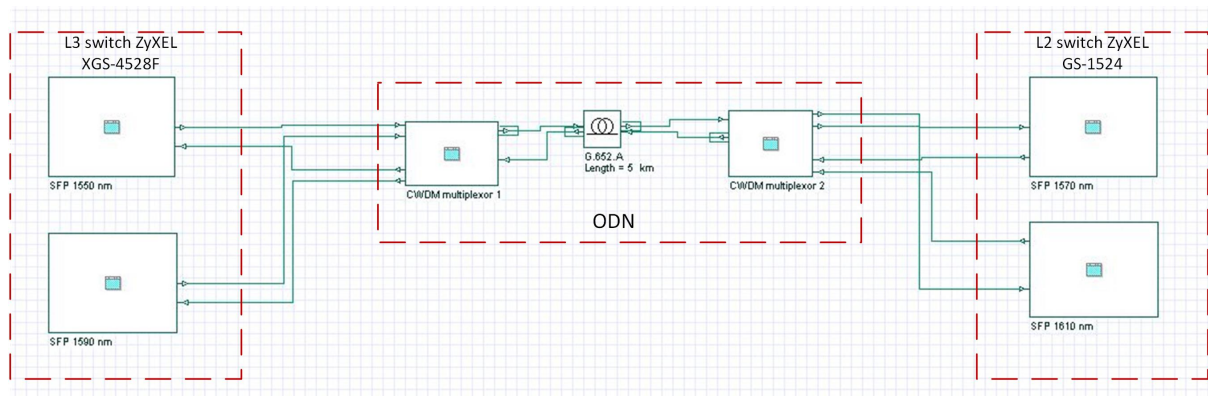
Kombinace délky tras (optická + metalická)	upload [kbit/s]	download [kbit/s]
0 km + 0 km	1745,02	3125,95
0 km + 1 km	330,699	2470,478
0 km + 2 km	85,411	814,275
0 km + 2,5 km	85,396	395,425
10 km + 0 km	1643,687	2995,224
10 km + 1 km	331,344	2452,75
10 km + 2 km	85,449	806,171
10 km + 2,5 km	85,516	395,129

V tabulce 25 jsou zobrazeny naměřené rychlosti pro VDSL2 profil. Zde je vidět u uploadu razantnější pokles rychlosti při přidání metalické trasy. V případě optické trasy 0 km už po přidání 1 km metalické trasy klesla rychlost z 1745,02 kbit/s na 330,699 kbit/s. Po přidání dalšího kilometru klesla rychlost na 85,411 kbit/s, poté už se hodnota uploadu neměnila. U downloadu je taky vidět větší pokles přenosových rychlostí při přidání metalické trasy. V případě optické trasy 0 km a metalické trasy 0 km byla naměřena rychlost downloadu 3125,95 kbit/s. Při délce metalické trasy 2,5 km tato rychlost spadla na 395,425 kbit/s. Změna optické trasy z 0 km na 10 km opět neměla na výsledné hodnoty vliv.

10 Simulace optické sítě v softwaru Optiwave Optisystem

Tato kapitola se zabývá návrhem optické sítě v softwaru Optiwave OptiSystem, který disponuje velkým množstvím komponent pro návrh optických sítí.

Pro testování byla vytvořena topologie optické sítě, která by měla co nejvíce odpovídat topologii optické části sítě při reálném měření. Na obrázku 77 je uvedena topologie sítě, která se skládá z jednotlivých bloků, které budou popsány dále v kapitole.



Obrázek 77: Topologie optické sítě

V tabulce 26 je zobrazeno nastavení globálních parametrů pro simulaci. Přenosová rychlost byla nastavena na 1 Gbit/s. Tuto rychlost podporovali použité switche od firmy ZyXEL v reálném měření.

Tabulka 26: Nastavené globální parametry pro simulaci

Parametr	Hodnota	Jednotky
Přenosová rychlost	1	Gbit/s
Délka sekvence	64	bitů
Počet vzorků na bit	64	-

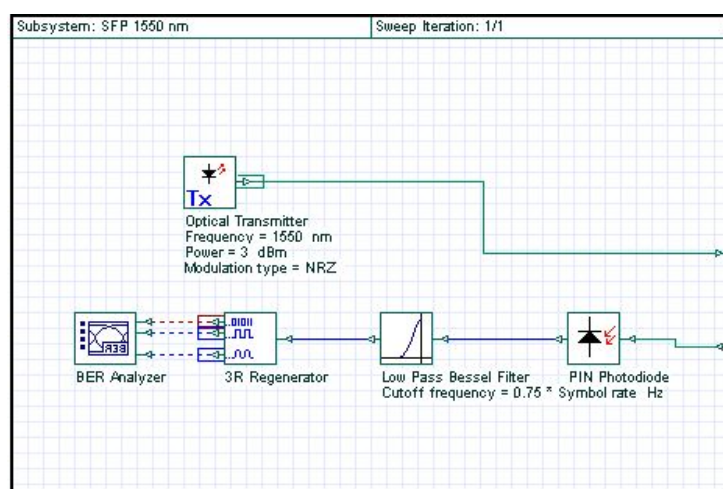
10.1 L3 switch ZyXEL XGS-4528F, L2 switch ZyXEL GS-1524

L3 switch ZyXEL XGS-4528F nese označení pro používaný switch, který se nacházel na straně serveru. L2 switch ZyXEL GS-1524 se využíval na straně DSLAMu. Blok SFP (Small-Form-Pluggable) reprezentuje použité moduly v reálném provozu a skládá se ze dvou částí, vysílací a přijímací. Vysílací část je tvořena WDM vysílačem. Pro jednotlivé SFP bloky byl každý nastaven na jinou vlnovou délku a vysílací výkon. Simulace probíhala pro dva kanály. Pro sestupný směr se využívaly vlnové délky 1550 nm a 1590 nm. Pro vzestupný směr vlnové délky 1570 a 1610 nm. V přijímací části je použita PIN fotodioda, která přeměňuje optický signál na elektrický. Dále je v přijímací části využit dolní propust (Besselův filtr) pro filtraci vysokofrekvenčního šumu a 3R generátor pro obnovu signálu. Pro vyhodnocení kvalitativních parametrů je využito

BER analyzátoru. V tabulce 27 je možné vidět nastavení optických výkonů u jednotlivých SFP modulů. Na obrázku 78 je zobrazen blok SFP pro nastavení vlnové délky na 1550 nm.

Tabulka 27: Nastavení optického výkonu

Vlnová délka [nm]	Optický výkon [dBm]
1550	3
1570	0
1590	2
1610	-7



Obrázek 78: Vysílací a přijímací část SFP 1550 nm

10.2 ODN

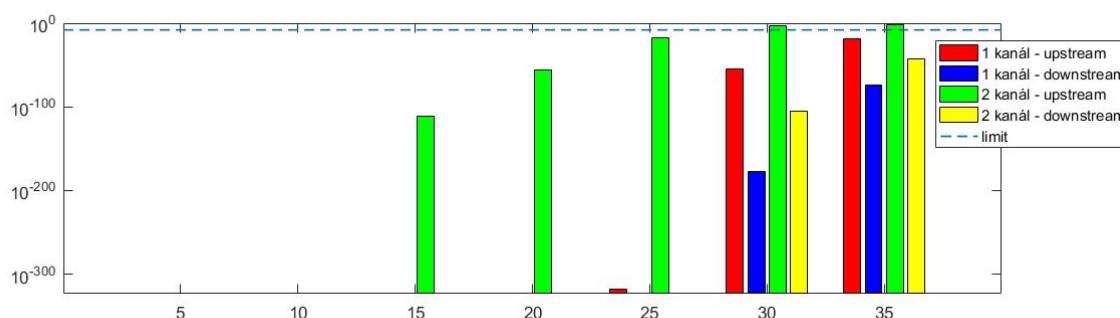
ODN (Optical Distribution Network) neboli optická distribuční síť se skládá z CWDM de/multiplexorů a z obousměrného optického vlákna. Parametry optického vlákna byly nastaveny podle změřených parametrů optických tras. Jedná se o optické vlákna G.652.A. Měření probíhalo pro délky tras 5 až 35 km s krokem 5 km. Pro každé délky byly zvlášť nastaveny vlastnosti vlákna, tak aby odpovídaly naměřeným hodnotám skutečných tras. Nastavení parametrů vlákna je zobrazeno v tabulce 28. Využívané multiplexory jsou čtyřkanálové a byl na nich nastaven vložný útlum 1 dB.

Tabulka 28: Parametry optického vlákna pro jednotlivé délky tras

Délka [km]	α [db/km]	CD [ps/(nm×km)]	Slope [ps/nm ²]	Koeficient PMD [ps/km ^{1/2}]
5	0,506	16,635	0,298618	0,182
10	0,323	16,641	0,580502	0,429
15	0,545	16,395	0,876866	0,155
20	0,481	16,662	1,153776	0,630
25	0,516	16,655	1,446242	0,545
30	0,571	16,668	1,715052	0,616
35	0,546	16,06	2,038351	0,503

10.3 Výsledky simulace

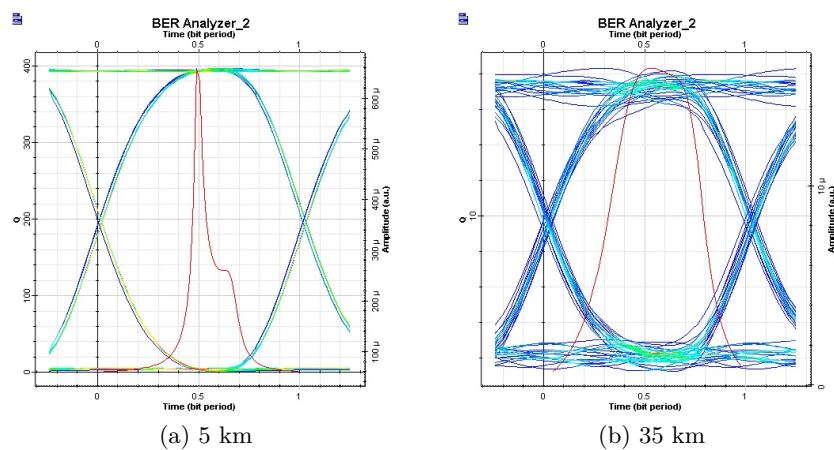
Měření optické sítě probíhalo na délkách tras 5 km až 35 km s krokem 5 km. Při jednotlivých simulacích byla zaznamenána bitová chybovost, Q-faktor, diagram oka a optické spektrum. Pro modulaci signálu je použita modulace NRZ.



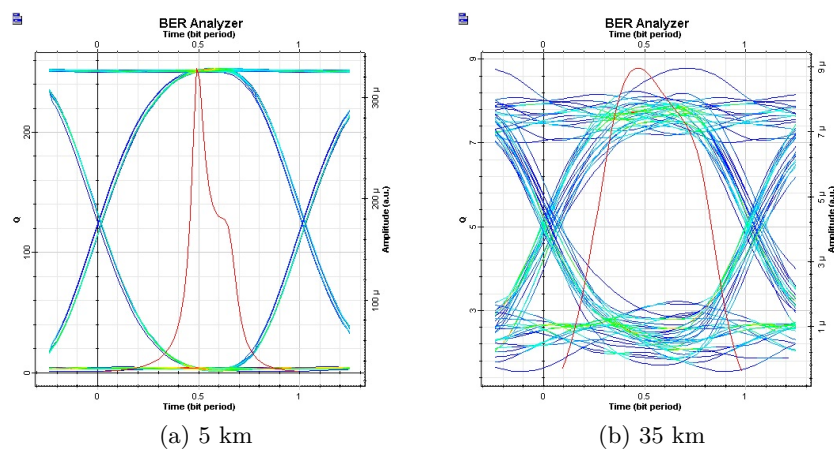
Obrázek 79: Hodnoty BER v logaritmickém vyjádření v závislosti na délce optické trasy

Na obrázku 79 jsou graficky zobrazené výsledky bitové chybovosti v logaritmickém měřítku v závislosti na délce trasy. Kvalitativní parametry jednotlivých kanálů lze vyhodnocovat pouze na základě BER analyzátoru. Jako kritickou hodnotu parametru BER byla zvolena limitní hodnota 1×10^{-9} (modrá přerušovaná čára). Tato hodnota určuje zda je kanál ještě schopný komunikace. Nejhorší parametry vykazoval druhý kanál ve vzestupném směru (1610 nm), který jako jediný přesáhl limit už při vzdálenosti 30 km. To z důvodu nastavení optického výkonu na zdroji záření u tohoto kanálu ve vzestupném směru na -7 dBm. Porovnání nastavených výkonů jednotlivých zdrojů lze vidět v tabulce 27. Nejlepší hodnotu bitové chybovosti vykazoval první kanál ve sestupném směru, u kterého začala narůstat bitová chybovost až při délce 30 km.

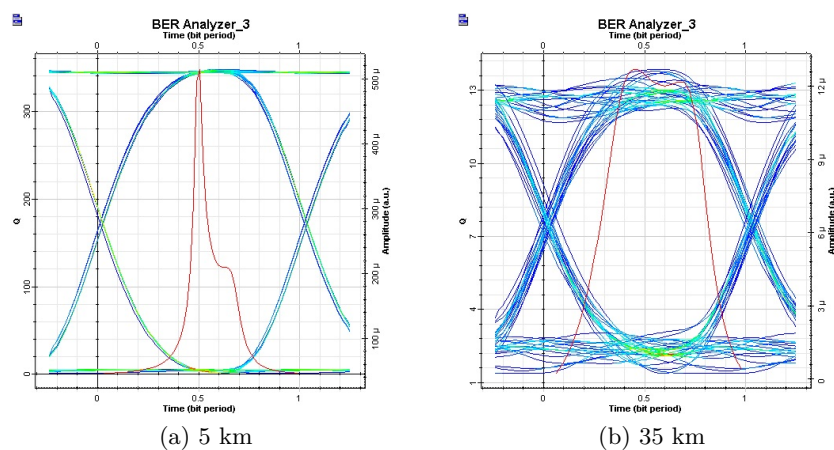
Na následujících obrázcích jsou výsledné diagramy oka pro vzdálenost 5 a 35 km u jednotlivých kanálů. Můžeme vidět, že otevřenost oka je maximální v případě 5 km trasy u obou kanálů. navýšením optické trasy na 35 km je nulová otevřenost oka v případě vzestupného směru u druhého kanálu.



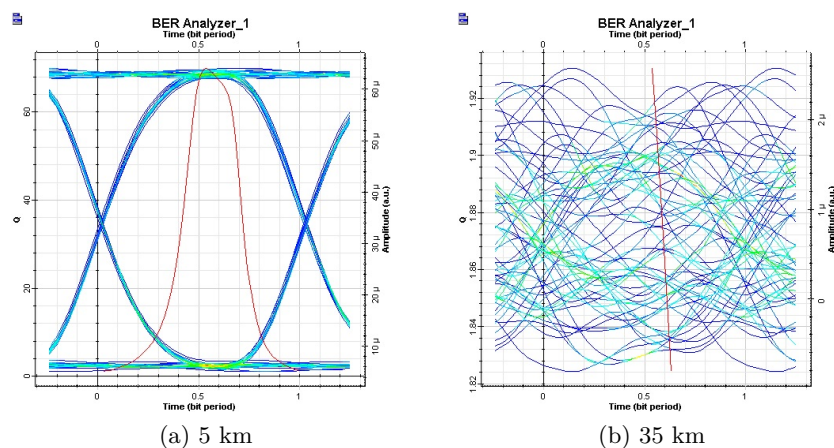
Obrázek 80: Diagram oka pro první kanál při trase 5 a 35 km, sestupný směr



Obrázek 81: Diagram oka pro první kanál při trase 5 a 35 km, vzestupný směr



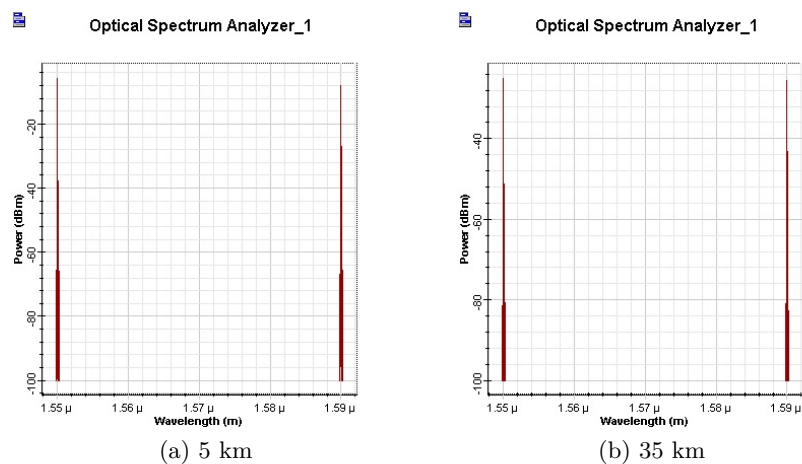
Obrázek 82: Diagram oka pro druhý kanál při trase 5 a 35 km, sestupný směr



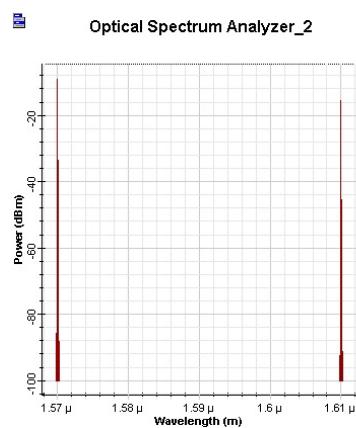
Obrázek 83: Diagram oka pro druhý kanál při trase 5 a 35 km, vzestupný směr

10.3.1 Spektrální charakteristika

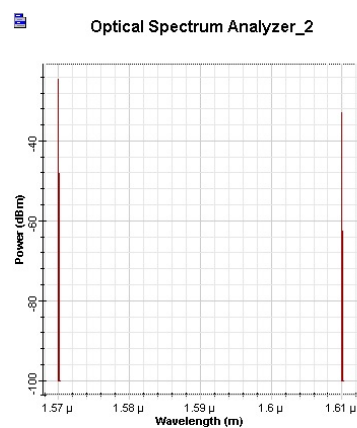
Na obrázcích níže jsou zobrazeny spektrální charakteristiky na výstupech z optického vlákna pro sestupný i vzestupný směr. Na obrázku 84 je zobrazeno spektrum pro sestupný směr při optické trase 5 a 35 km a na obrázku 85 je zobrazeno spektrum pro vzestupný směr při stejné délce optické trasy.



Obrázek 84: Optické spektrum při trase 5 a 35 km, sestupný směr



(a) 5 km



(b) 35 km

Obrázek 85: Optické spektrum při trase 5 a 35 km, vzestupný směr

11 Závěr

Cílem diplomové práce bylo vytvoření heterostrukturální sítě a analýza vlivu změny délek optických a metalických tras na integritu sítě a na nasazení Triple Play služeb.

První část diplomové práce se zabývala teoretickým rozbořem. Byla rozdělena do pěti kapitol. V první kapitole byla popsána optická přístupová síť, včetně funkčních bloků a technologie FTTx. Druhá kapitola teoretické části byla zaměřena na popis pasivní optické sítě a její standardy. Mezi tyto standardy patří APON, BPON, GPON a EPON. Třetí kapitola byla věnována technologiím nové generace, mezi které patří WDM-PON, ODSM-PON, STACKED XG-PON a další technologie. V této kapitole byly popsány i hybridní xPON/xDSL sítě, které kombinují technologii PON s technologií DSL. V další kapitole byl proveden rozbor xDSL technologií, hlavně popis technologie ADSL, která byla využita v praktické části. V poslední kapitole teoretické části byly popsány Triple Play služby, mezi které patří VoIP, IPTV, datová služba a kvalita služeb QoS. U služeb VoIP a IPTV byly popsány jednotlivé kodeky, které využívají a protokoly. Dále byly pro tyto služby popsány subjektivní a objektivní metody hodnocení.

Praktická část se skládá ze čtyř kapitol. V první kapitole byla popsána infrastruktura vytvořené heterostrukturální sítě, používané zařízení, měřicí přístroje a programy. V této kapitole byly také vyhodnoceny výsledky proměřených optických tras, jako chromatická a polarizačně vidová disperze, dále zde byl popsán vliv délky metalické trasy na přenosové rychlosti ADSL2+ a VDSL2. V druhé kapitole praktické části bylo prováděno testování integrity heterostrukturální sítě (CWDM/xDSL) pomocí testů RFC 2544 a ITU-T Y.1564 EtherSAM. Testy byly prováděny pro různé kombinace délek tras a byl vyhodnocen jejich vliv na měřené parametry testů. Další kapitola byla věnována nasazení Triple Play služeb na vytvořenou heterostrukturální síť. IPTV služba byla analyzována softwarem MSU Video Quality Measurement pro multicastový i unicastový provoz. Kdy byly nahrány vzorky vysílaných videí a následně proběhlo testování objektivními metodami, konkrétně se jednalo o parametry MSE, PSNR a SSIM. Multicastový provoz byl ještě analyzován přístrojem EXFO AXS-200/625, který umožňoval testovat parametry videa jako přenosovou rychlost a ztrátovost paketů. Hlasová služba byla testována pomocí softwaru IxChariot od firmy Ixia, který byl nainstalovaný na virtuálním stroji. Pro hlasovou službu byly testovány parametry MOS a R-faktoru mezi dvěma tzv. Endpointy. Jako Endpointy byly využity dva počítače, jeden na straně serveru a druhý na straně koncového uživatele. Datová služba byla analyzována softwarem BWMeter, kdy byly proměřeny rychlosti při stahování a nahrávání souborů. V poslední části diplomové práce bylo vytvoření optické části sítě v softwarové aplikaci Optiwave OptiSystem a provést měření na reálných datech získaných při měření v laboratoři. Pro nastavení simulace byly využity naměřené parametry jako útlum optických tras a jejich hodnoty chromatické a polarizačně vidové disperze. Dále byly nastaveny výkonnostní parametry jednotlivých vysílačů tak, jak byly naměřeny u využívaných SFP modulů. Byla provedena simulace a následné vyhodnocení pomocí diagramu oka, bitové chybovosti při délce optické trasy 5 až 35 km s krokem 5 km.

Při vyhodnocování výsledků na vytvořené topologii sítě, bylo zjištěno, že změna délky optické trasy z 0 km na 10 km neměla na měření velký vliv. Měření bylo výrazněji ovlivněno změnou délek metalické trasy. Je to dané také tím, že při využití optické trasy jsme schopni překlenout větší vzdálenosti při vyšších přenosových rychlostech, než je v případě metalického vedení.

Myslím si, že diplomová práce na téma Měření Triple play služeb v heterostrukturální síti by mohla být užitečnou pomůckou při dalším zpracování témat pro studenty, kdy by mohli provést měření pro více kombinací tras při využití jiných profilů u ADSL2+ a VDSL2. Popřípadě měnit parametry QoS a analyzovat vliv na Triple Play služby na vytvořené heterostrukturální síti.

Literatura

- [1] KAZOVSKY, Leonid G., et al.; Broadband Optical Access Networks. Canada: Wiley, 2011. 283 p. ISBN 978-0-470-18235-2.
- [2] PRAT, Josep. Next-generation FTTH passive optical networks: research towards unlimited bandwidth access. 2008. ISBN 978-1-4020-8469-0.
- [3] LAM, Cedric. Passive Optical Networks: Principles and practice. Oxford: Elsevier Onc., 2007. 324 p. ISBN 978-0-12-373853-0.
- [4] Performance Characterization of PON Technologies. Alex Vukovic, Khaled Maamoun, Heng Hua, Michel Savoie Broadband Applications and Optical Networks, Communications Research Centre (CRC), Ottawa, ON, Canada, K2H 8S2 [online].[cit. 2016-11-23]. Dostupné z: http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/Access/PON/PN_07_PON_Technologies.pdf.
- [5] Lafata, Pavel a Vodrážka, Jiří. Pasivní optická síť GPON. Access server. [Online] 23.5.2009. [cit. 2016-11-28] <http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=pasivni-opticka-sitgpon&cislocclanku=2009050002>. 1214-9675.
- [6] Lafata, Pavel. Pasivní optická přístupová síť EPON. Access server. [Online] 23.5.2009. [cit. 2016-11-28]. Dostupné z WWW: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=pasivniopticka-pristupova-sit-epon&cislocclanku=2009050003>. 1214-9675.
- [7] LAFATA, Pavel. Pasivní optické sítě WDM-PON. [online]. 24.5.2009 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cislocclanku=2009050004>.
- [8] Filka, Miloslav. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Brno: Miloslav Filka, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [9] Next-Generation PON Evolution. Next-Generation PON Evolution [online]. 2012, č. 1, s. 24 [cit. 2012-10-09]. Dostupné z: <http://www.huawei.com/us/static/hw-077443.pdf>.
- [10] Filip, Josef. 2015. Širokopásmová FTTx přípojka na architektuře WDM-PON sítě. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Jan Látal.
- [11] GORALSKI, Walter. ADSL and DSL technologies. New York: McGraw-Hill, c1998, xxxii, 379 p. ISBN 00-702-4679-3.
- [12] GOLDEN, Philip., Herve. DEDIEU a Krista. JACOBSEN. Implementation and applications of DSL technology. Boca Raton: Auerbach Publications, c2008. ISBN 0849334233.
- [13] VODRÁŽKA, Jiří. Přenosové systémy v přístupové síti. 2. vyd., přeprac. Praha: ČVUT, 2006, 189 s. ISBN 80-010-3386-4.

- [14] Žák, Petr. Přehled technologií xDSL (1) – IDSL a HDSL. Svetsiti.cz [online]. [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://www.svetsiti.cz/clanek.asp?cid=Prehled-technologiei-xDSL-1-IDSL-a-HDSL-2272002>.
- [15] Vesejda, M. HDSL - 1 část. Access server. [online]. [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=hdsl-1cast&cisloclanku=2004072901>.
- [16] Vesejda, M. ADSL – 1. část. Access server. [online]. [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072903>.
- [17] HENS, Francisco J. a Jose Manuel. CABALLERO. Triple play: building the converged network for IP, VoIP and IPTV. Hoboken, NJ: Wiley, c2008. ISBN 0470753676.
- [18] SPURNÁ, Ivona. Počítačové sítě. Kralice na Haní: Computer Media s.r.o., 2010. 180 s. ISBN 978-80-7402-036-0.
- [19] Network Sorcery, Inc. RTP, Real-time Transport Protocol [online]. Network Sorcery, Inc., 2012. [cit. 2017-02-25]. Dostupné z: <http://www.networksorcery.com/enp/protocol/rtp.htm>.
- [20] BUŠKA, Petr. Jak multicast funguje [online]. 2009 [cit. 2017-02-26]. Dostupné z: <http://www.samuraj-cz.com/clanek/tcpip-skupinove-vysilani-ip-multicast-a-cisco/>.
- [21] Gerard O'Driscoll.: Next Generation IPTV Services and Technologies, WILEY- INTER-SCIENCE A JOHN WILEY & SONS, INC., Publication, New Jersey 2008, ISBN 978-0-470-16372-6.
- [22] Krejčí, J. a Zeman, T. . Hodnocení kvality IPTV. Access server. [online]. 2010 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=hodnoceni-kvality-iptv&cisloclanku=2010050004>.
- [23] Nemčík, M. Hodnotenie kvality prenosu reči. Access server. [online]. 2006 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=hodnotenie-kvality-prenosu- reci&cisloclanku=2006050402>.
- [24] Vodrážka, J. Hodnocení kvality telefonního přenosu pomocí E-modelu. Access server. [online]. 2006 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=hodnoceni-kvality-telefonniho-prenosu-pomoci-e-modelu& cisloclanku=2004100501>.
- [25] Zyxel. Zyxel [online]. 2013 [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <http://zyxel.com/>.
- [26] XtendLan. XtendLan [online]. 2014 [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: <https://www.xtendlan.com/>.

- [27] Exfo. Exfo Inc. [online]. 2010 [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <http://www.exfo.com/>.
- [28] Simulátor vedení Spirent DLS 6900. TR instrumets. [online]. 2010 [cit. 2017-03-31]. Dostupné z: <http://www.trinstruments.cz/data/files/dls-6900-new-awgn-singleline-26awg-pe04-wireline-simulator-datasheet-758.pdf>
- [29] IETF, Benchmarking Methodology for Network Interconnect Devices: RFC 2544. Network Working Group, [online]. 1999 [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.ietf.org/rfc/rfc2544.txt>
- [30] THIERNO, Diallo a Marquis DORAIS. EtherSAM: THE NEW STANDARD IN ETHER-NET SERVICE TESTING. Rateart [online]. 2013 [cit. 2017-04-01]. Available from: http://www.rateart.pl/public_files/spec/appnote230.3-ang.pdf

A Obsah DVD

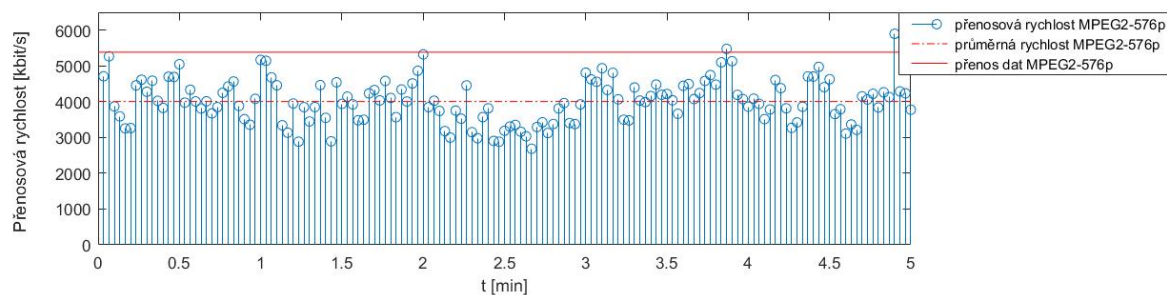
Součástí DP je DVD. Jeho adresářová struktura je následující:

- 01 Elektronická verze DP
- 02 Výsledky měření OTDR
- 03 Výsledky měření CD
- 04 Výsledky měření PMD
- 05 Výsledky měření spektrální analýzy
- 06 Výsledky měření přenosových rychlostí ADSL2+, VDSL2
- 07 Výsledky měření RFC 2544
- 08 Výsledky měření ITU-T Y.1564 EtherSAM
- 09 Výsledky analýzy IPTV - EXFO-200-625
- 10 Výsledky analýzy IPTV - MSU VQMT
- 11 Výsledky měření služby VoIP
- 12 Výsledky měření služby Data
- 13 Výsledky simulace
- 14 Fotografie měřícího pracoviště

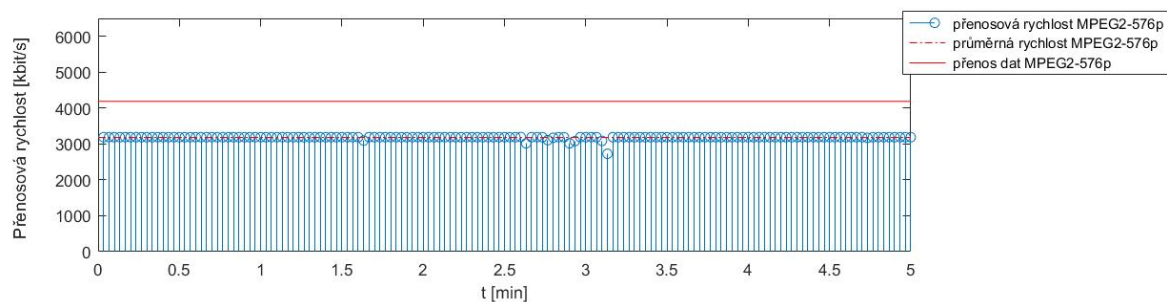
B Grafy

Měření přenosové rychlosti vzorků videa

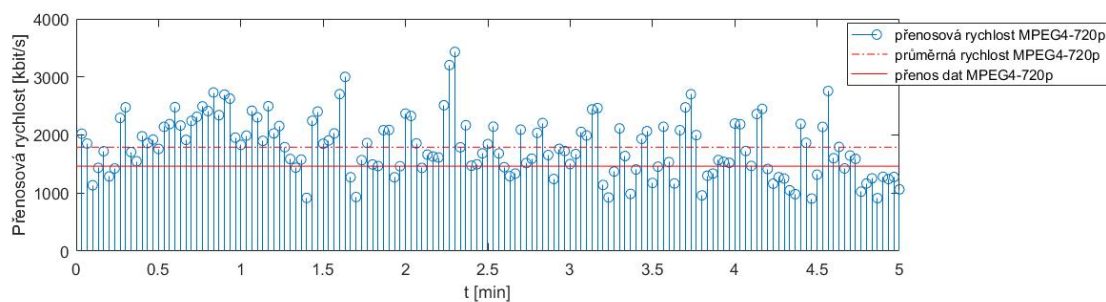
Na následujících obrázcích jsou zobrazeny přenosové rychlosti při testování přístrojem EXFO AXS-200/625 u VDSL2.



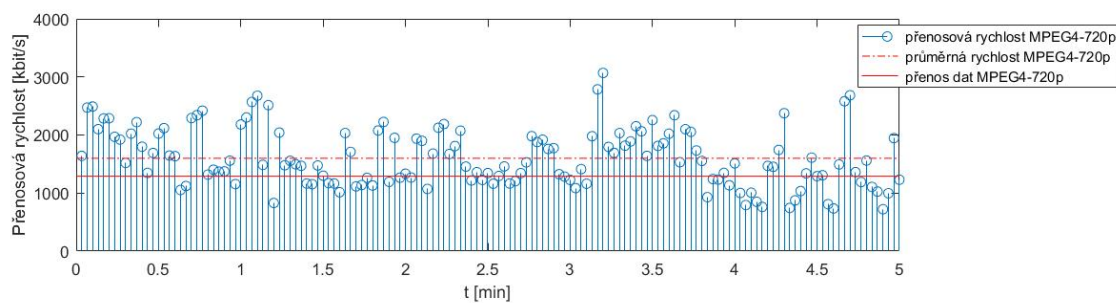
Obrázek 86: Přenosová rychlost videa MPEG-2 576p při 0 km trase a 0 km metalické trasy u VDSL2



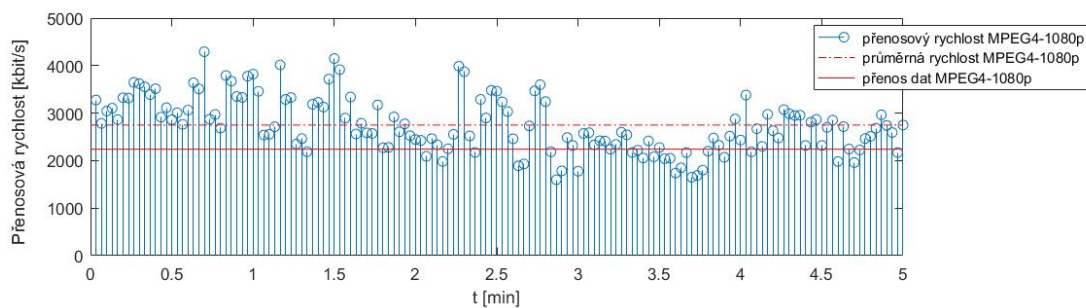
Obrázek 87: Přenosová rychlost videa MPEG-2 576p při 10 km trase a 2,5 km metalické trasy u VDSL2



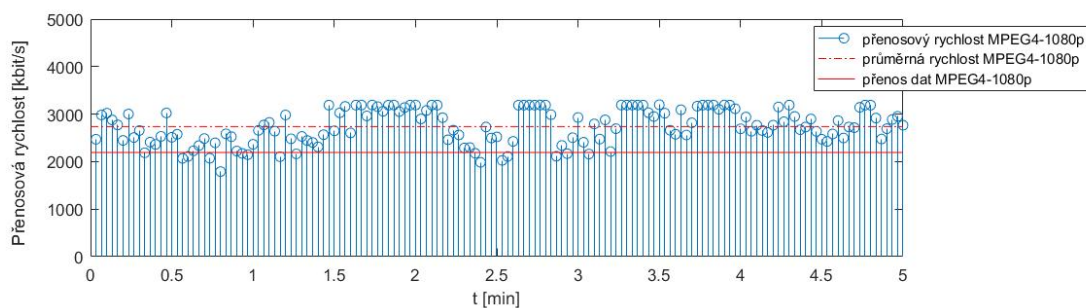
Obrázek 88: Přenosová rychlost videa MPEG-4 720p při 0 km trase a 0 km metalické trasy u VDSL2



Obrázek 89: Přenosová rychlost videa MPEG-4 720p při 10 km trase a 2,5 km metalické trasy u VDSL2

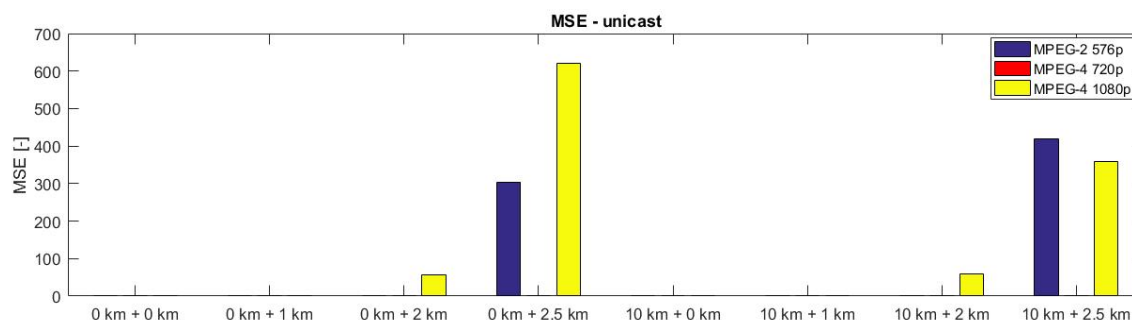


Obrázek 90: Přenosová rychlost videa MPEG-4 1080p při 0 km trase a 0 km metalické trasy u VDSL2

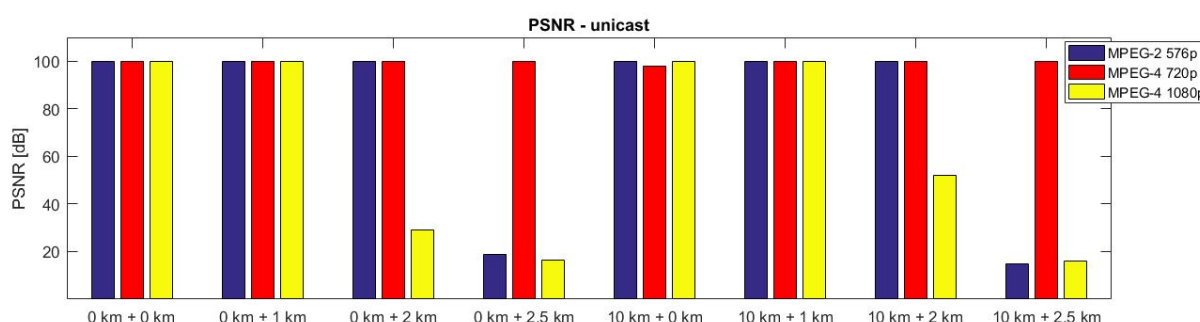


Obrázek 91: Přenosová rychlost videa MPEG-4 1080p při 10 km trase a 2,5 km metalické trasy u VDSL2

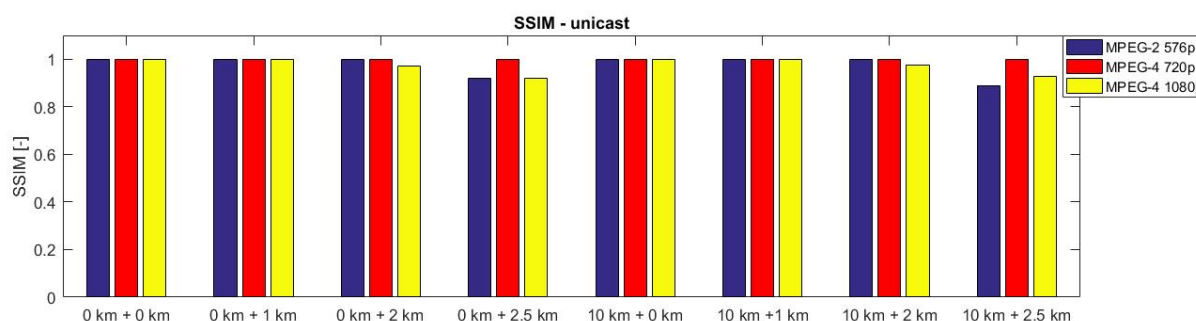
Výsledky testování IPTV pomocí softwaru MSU - VDSL2 - unicast



Obrázek 92: Hodnoty parametru MSE u unicastového provozu, VDSL2



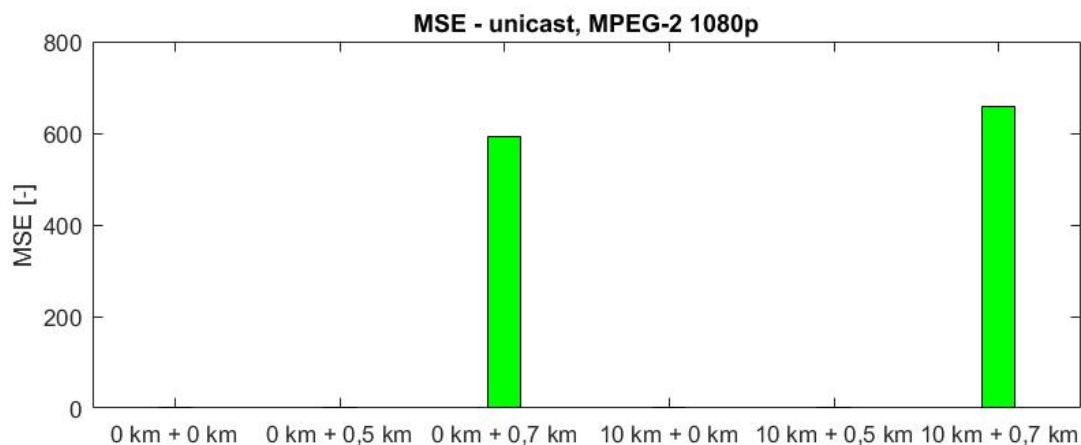
Obrázek 93: Hodnoty parametru PSNR u unicastového provozu, VDSL2



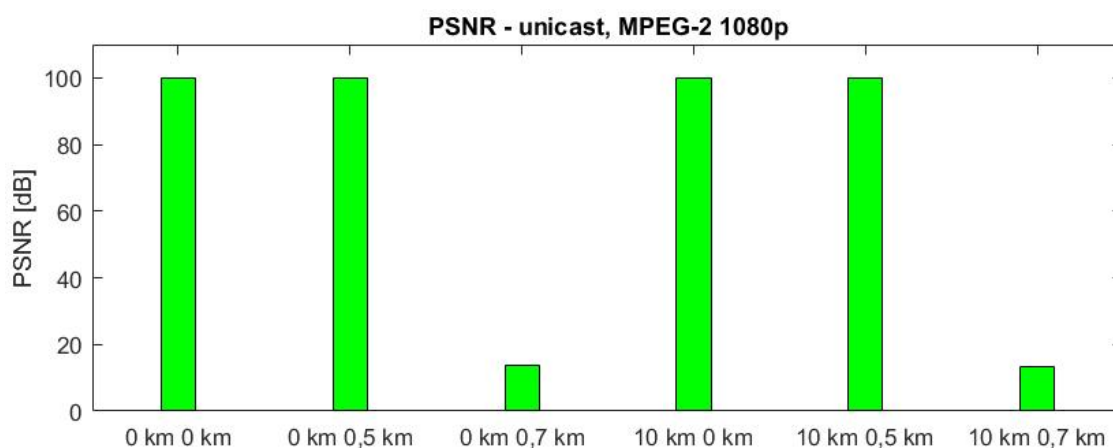
Obrázek 94: Hodnoty parametru SSIM u unicastového provozu, VDSL2

Na obrázcích 92, 93 a 94 jsou zobrazeny výsledné hodnoty parametrů MSE, SSIM, PSNR při unicastovém provozu u profilu VDSL2. Na měření opět neměla vliv změna optické trasy z 0 km na 10 km. Největší vliv změny metalické trasy měl na vzorky videí MPEG-2 576p, MPEG-2 1080p a MPEG-4 1080p. Vzorek videa MPEG-2 576p byl nejvíce ovlivněn až při délce metalické trasy 2,5 km, kde se hodnota MSE pohybovala v rozmezí od 300 do 420. Na parametru PSNR se to projevilo klesnutím na hodnoty od 14 do 18 dB a parametr SSIM se pohyboval kolem hodnot 0,89 - 0,91. Vzorek MPEG-4 1080p, který byl také více ovlivněn až na délce trasy 2,5 km, se hodnota parametru MSE pohybovala okolo 658 při optické trase 0 km. Hodnota parametru

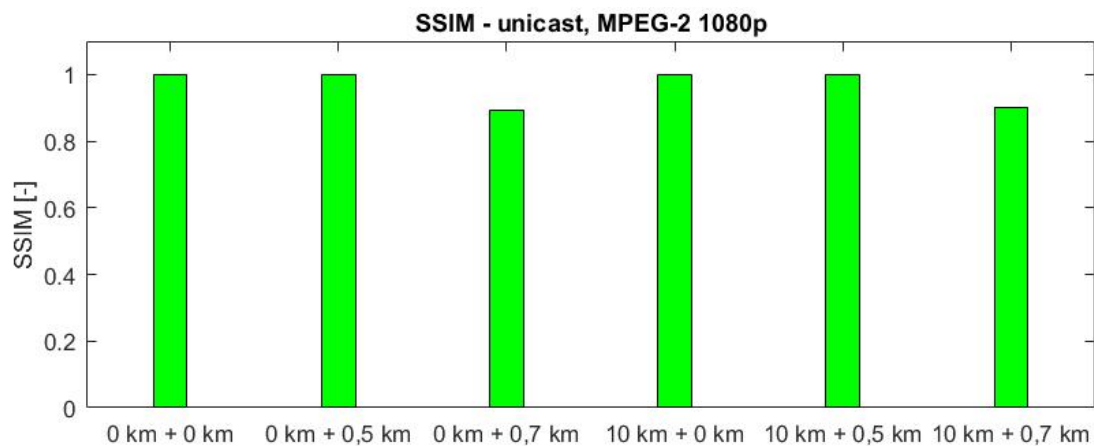
PSNR spadla ze 100 db spadla na hodnotu okolo 16 dB a hodnota SSIM se pohybovala kolem hodnot 0,92. Na vzorek videa MPEG-4 720p neměla změna metalické trasy výrazný vliv a měřené parametry na tomto vzorku vykazovaly nejlepší hodnoty.



Obrázek 95: Hodnoty parametru MSE u unicastového provozu, VDSL2 - MPEG-2 1080p



Obrázek 96: Hodnoty parametru PSNR u unicastového provozu, VDSL2 - MPEG-2 1080p



Obrázek 97: Hodnoty parametru SSIM u unicastového provozu, VDSL2 - MPEG-2 1080p

Na obrázcích 95 až 97 jsou zobrazeny naměřené parametry pro vzorek videa MPEG-2 1080p. Kvůli větší šířce pásma, kterou tento vzorek potřebuje, tak bylo provedeno měření jen do vzdálenosti 0,7 km. Hodnota parametru MSE se začala měnit až při vzdálenosti 0,7 km metalické trasy, kdy dosahovala hodnot kolem 600. Při této délce trasy byla kvalita videa už hodně degradována. Hodnota parametru PSNR klesla na hodnotu kolem 13 dB a hodnota SSIM se pohybovala okolo hodnot 0,9. Změna optické trasy neměla na měření velký vliv.

C Tabulky

Výsledky měření pomocí MSU, ADSL2+

V tabulkách 29 až 31 jsou zobrazeny výsledky parametrů MSE, PSNR a SSIM u profilu ADSL2+

Tabulka 29: Hodnoty parametru MSE, ADSL2+

Kombinace délek tras (opt. + met.)	Multicast			Unicast		
	MPEG-2 576p	MPEG-4 720p	MPEG-4 1080p	MPEG-2 576p	MPEG-4 720p	MPEG-4 1080p
0 km + 0 km	15,38301	30,0185	11,29792	0,0002	1,32359	0,55598
0 km + 1 km	3,481833	50,72523	67,86302	0	0	0
0 km + 2 km	0,000531	21,91832	18,22545	180,863	0,01464	0,0015
0 km + 3 km	370,2948	51,14175	53,00198	10,09981	0	36,65266
10 km + 0 km	3,82624	13,30039	15,09276	0	0,02876	0,05387
10 km + 1 km	8,34675	73,22746	65,86948	0	0,00569	0,01748
10 km + 2 km	37,39646	32,73812	94,46539	7,12833	0,00152	21,90938
10 km + 3 km	87,71765	75,91179	45,86566	4,75947	0	42,94242

Tabulka 30: Hodnoty parametru PSNR, ADSL2+

Kombinace tras délek (opt. + met.)	Multicast			Unicast		
	MPEG-2 576p	MPEG-4 720p	MPEG-4 1080p	MPEG-2 576p	MPEG-4 720p	MPEG-4 1080p
0 km + 0 km	47,8001	72,53011	63,13089	99,9933	99,41244	95,74914
0 km + 1 km	94,69722	38,45066	50,0881	100	100	100
0 km + 2 km	99,76673	67,25517	34,69037	34,48023	99,92726	98,54523
0 km + 3 km	17,52867	58,45123	54,2811	57,9471	100	61,14783
10 km + 0 km	96,12999	69,07024	66,08171	100	99,70157	98,6005
10 km + 1 km	77,08961	30,94003	40,21001	100	99,99038	99,83751
10 km + 2 km	34,3661	56,76393	29,73571	65,37419	99,9908	66,64961
10 km + 3 km	31,29761	33,27739	41,80946	81,56624	100	52,18049

Tabulka 31: Hodnoty parametru SSIM, ADSL2+

Kombinace délek tras (opt. + met.)	Multicast			Unicast		
	MPEG-2 576p	MPEG-4 720p	MPEG-4 1080p	MPEG-2 576p	MPEG-4 720p	MPEG-4 1080p
0 km + 0 km	0,9863	0,98841	0,989241	1	0,99968	0,99992
0 km + 1 km	0,9992	0,97831	0,97619	1	1	1
0 km + 2 km	1	0,99098	0,984397	0,93688	0,9999	1
0 km + 3 km	0,90335	0,98285	0,981625	0,98945	1	0,98593
10 km + 0 km	0,99975	0,9922	0,98822	1	0,9999	0,99994
10 km + 1 km	0,99309	0,97337	0,97344	1	1	0,9998
10 km + 2 km	0,97388	0,98696	0,96164	0,99282	1	0,98868
10 km + 3 km	0,95464	0,97379	0,98202	0,99507	1	0,98046

Výsledky měření pomocí MSU, VDSL2

V tabulkách 32 až 37 jsou zobrazeny výsledky parametrů MSE, PSNR a SSIM u profilu VDSL2 pro unicastový a multicastový provoz.

Tabulka 32: Hodnoty parametru MSE pro mutlicast, VDSL2

kombinace délek tras (opt. + met.)	MPEG-2 576p	MPEG-2 1080p	MPEG-4 720p	MPEG-4 1080p
0 km + 0 km	38,21622	0,00305	1,03988	24,15729
0 km + 0,5 km	0,00004	0,00576	0,09673	0,00679
0 km + 0,7 km	-	720,24597	-	-
0 km + 1 km	39,32692	-	29,79901	0,07826
0 km + 2 km	0,00005	-	65,13393	33,42065
0 km + 2,5 km	420,98615	-	1,06112	490,89352
10 km + 0 km	0,00022	0,10339	0	0,10819
10 km + 0,5 km	0,00048	107,46832	24,57894	17,90966
10 km + 0,7 km	-	631,90997	-	-
10 km + 1 km	11,53462	-	42,9518	0,04089
10 km + 2 km	51,77171	-	0,07018	42,90588
10 km + 2,5 km	419,84525	-	19,23634	500,596

Tabulka 33: Hodnoty parametru PSNR pro mutlicast, VDSL2

kombinace délek tras (opt. + met.)	MPEG-2 576p	MPEG-2 1080p	MPEG-4 720p	MPEG-4 1080p
0 km + 0 km	82,68	99,96601	94,41298	70,66391
0 km + 0,5 km	99,98389	99,87025	99,60283	99,7528
0 km + 0,7 km	-	12,84994	-	-
0 km + 1 km	84,17114	-	55,7756	98,80361
0 km + 2 km	99,98355	-	51,1195	64,80092
0 km + 2,5 km	14,65065	-	94,42829	15,80047
10 km + 0 km	99,85106	99,38743	100	97,54377
10 km + 0,5 km	99,91395	46,91933	56,9383	92,16055
10 km + 0,7 km	-	14,22254	-	-
10 km + 1 km	55,56013	-	83,34254	98,95819
10 km + 2 km	88,96773	-	99,07968	54,43897
10 km + 2,5 km	14,70448	-	81,53223	14,07123

Tabulka 34: Hodnoty parametru SSIM pro mutlicast, VDSL2

kombinace délek tras (opt. + met.)	MPEG-2 576p	MPEG-2 1080p	MPEG-4 720p	MPEG-4 1080p
0 km + 0 km	0,98724	1	0,99951	0,99098
0 km + 0,5 km	1	0,99999	0,99996	0,99998
0 km + 0,7 km	-	0,89093	-	-
0 km + 1 km	0,98792	-	0,98602	0,99995
0 km + 2 km	1	-	0,97435	0,98624
0 km + 2,5 km	0,89045	-	0,99916	0,92501
10 km + 0 km	1	0,99996	1	0,99989
10 km + 0,5 km	1	0,95494	0,98593	0,9951
10 km + 0,7 km	-	0,90557	-	-
10 km + 1 km	0,98883	-	0,98837	0,99996
10 km + 2 km	0,99387	-	0,99994	0,98234
10 km + 2,5 km	0,89077	-	0,99132	0,92501

Tabulka 35: Hodnoty parametru MSE pro unicast, VDSL2

kombinace délek tras (opt. + met.)	MPEG-2 576p	MPEG-2 1080p	MPEG-4 720p	MPEG-4 1080p
0 km + 0 km	0,0166	0,00144	0	0
0 km + 0,5 km	0	0,00213	0,00047	0
0 km + 0,7 km	-	591,87268	-	-
0 km + 1 km	0,0027	-	0,00376	0
0 km + 2 km	0	-	0,00339	56,04162
0 km + 2,5 km	303,97681	-	0	619,89026
10 km + 0 km	0	0,00083	0,91953	0
10 km + 0,5 km	0,00195	0,0009	0,03067	0
10 km + 0,7 km	-	658,48193	-	-
10 km + 1 km	0	-	0,00551	0
10 km + 2 km	0,00781	-	0,0059	58,17579
10 km + 2,5 km	418,26959	-	0	358,82526

Tabulka 36: Hodnoty parametru PSNR pro unicast, VDSL2

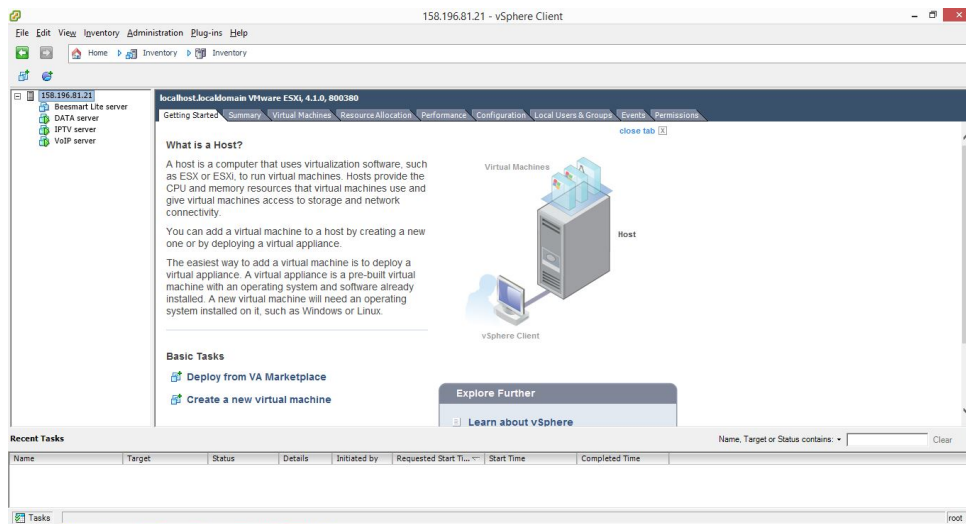
kombinace délek tras (opt. + met.)	MPEG-2 576p	MPEG-2 1080p	MPEG-4 720p	MPEG-4 1080p
0 km + 0 km	99,74064	99,99001	100	100
0 km + 0,5 km	100	99,98496	99,99133	100
0 km + 0,7 km	-	13,5752	-	-
0 km + 1 km	99,99026	-	99,99053	100
0 km + 2 km	100	-	99,9905	29,23301
0 km + 2,5 km	18,92071	-	100	16,40988
10 km + 0 km	100	99,9782	97,78472	100
10 km + 0,5 km	99,67333	99,98752	99,17045	100
10 km + 0,7 km	-	13,52132	-	-
10 km + 1 km	100	-	99,98982	100
10 km + 2 km	99,99077	-	99,99001	52,0402
10 km + 2,5 km	14,74405	-	100	15,98884

Tabulka 37: Hodnoty parametru SSIM pro unicast, VDSL2

kombinace délek tras (opt. + met.)	MPEG-2 576p	MPEG-2 1080p	MPEG-4 720p	MPEG-4 1080p
0 km + 0 km	0,99998	1	1	1
0 km + 0,5 km	1	1	1	1
0 km + 0,7 km	-	0,89231	-	-
0 km + 1 km	1	-	1	1
0 km + 2 km	1	-	1	0,97247
0 km + 2,5 km	0,91891	-	1	0,92165
10 km + 0 km	1	1	0,99981	1
10 km + 0,5 km	1	1	0,99996	1
10 km + 0,7 km	-	0,90249	-	-
10 km + 1 km	1	-	1	1
10 km + 2 km	1	-	0,99999	0,97662
10 km + 2,5 km	0,88989	-	1	0,92958

D Konfigurace služeb Triple Play na serveru Abacus

V této příloze jsou zobrazeny konfigurace a nastavení jednotlivých služeb. Pro VoIP je zde zobrazeno nastavení PBX Asterisku. Pro IPTV je zobrazen postup pro streamování videa a následného přijímání streamu. Dále je zde zobrazena stránka datového serveru.



Obrázek 98: Prostředí programu vmware

Asterisk

```
GNU nano 2.2.6      File: /etc/asterisk/sip.conf

[general]
port=5060
allow=alaw
binaddr=0.0.0.0

[1000]
callerid=1000
type=friend
host=dynamic
secret=1000
username =1000

[2000]
callerid = 2000
type=friend
host=dynamic
secret=2000
username=2000

[3000]
callerid = 3000
type=friend
host=dynamic
secret=3000
username=3000

[ Read 26 lines (Warning: No write permission) ]
^G Get Help  ^O WriteOut  ^R Read File ^Y Prev Page ^K Cut Text  ^C Cur Pos
^X Exit      ^J Justify   ^W Where Is ^V Next Page ^U UnCut Text ^T To Spell
```

Obrázek 99: Výpis souboru sip.conf


```

officer@VoIPserver: ~
Dash Home 2.6 File: /etc/asterisk/extensions.conf Modified

[default]
exten => 1000,1,Dial(SIP/1000)
exten => 2000,1,Dial(SIP/2000)

```

Obrázek 100: Výpis souboru extensions.conf

```

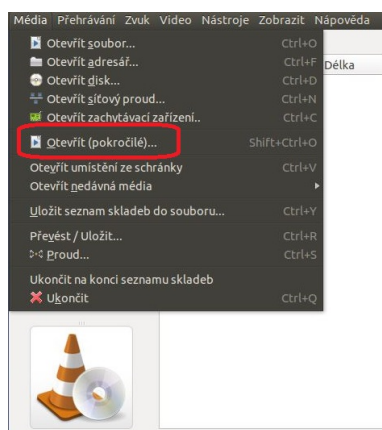
-- Registered SIP '2000' at 10.1.4.7:5060
> Saved useragent "SIPPER for PhonerLite" for peer 2000

```

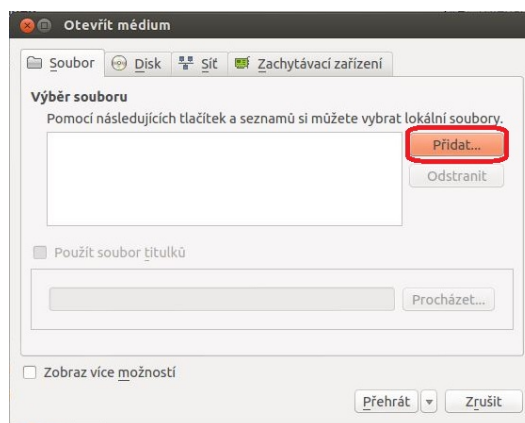
Obrázek 101: Výpis při registraci koncového zařízení

IPTV

Postup pro nastavení vysílání videa a přijímání videa.

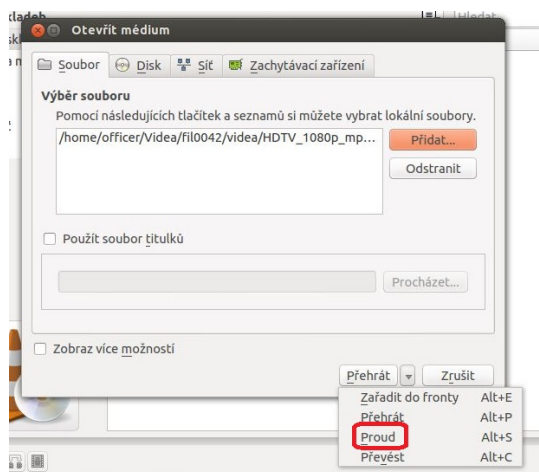


(a) Krok 1

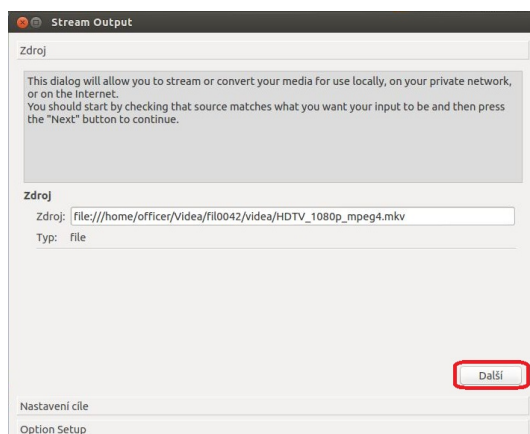


(b) Krok 2

Obrázek 102: Nastavení vysílání videa krok 1 a 2

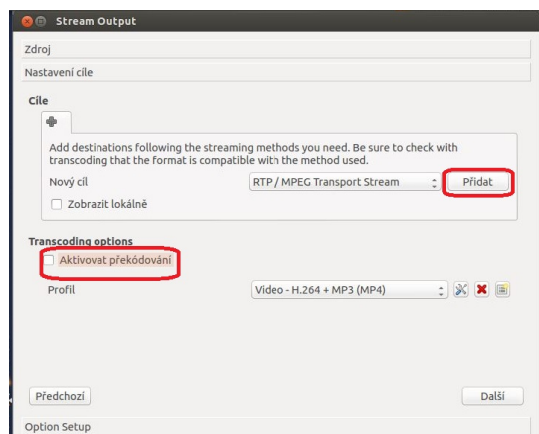


(a) Krok 3

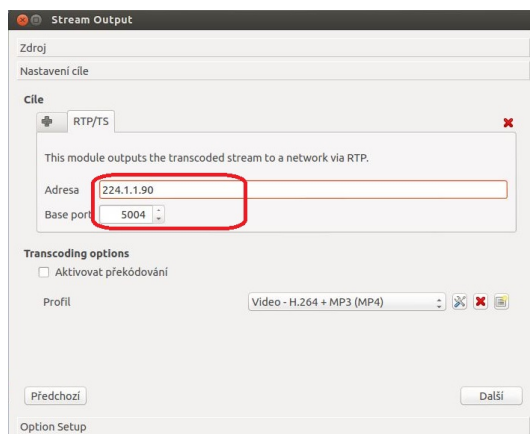


(b) Krok 4

Obrázek 103: Nastavení vysílání videa krok 3 a 4

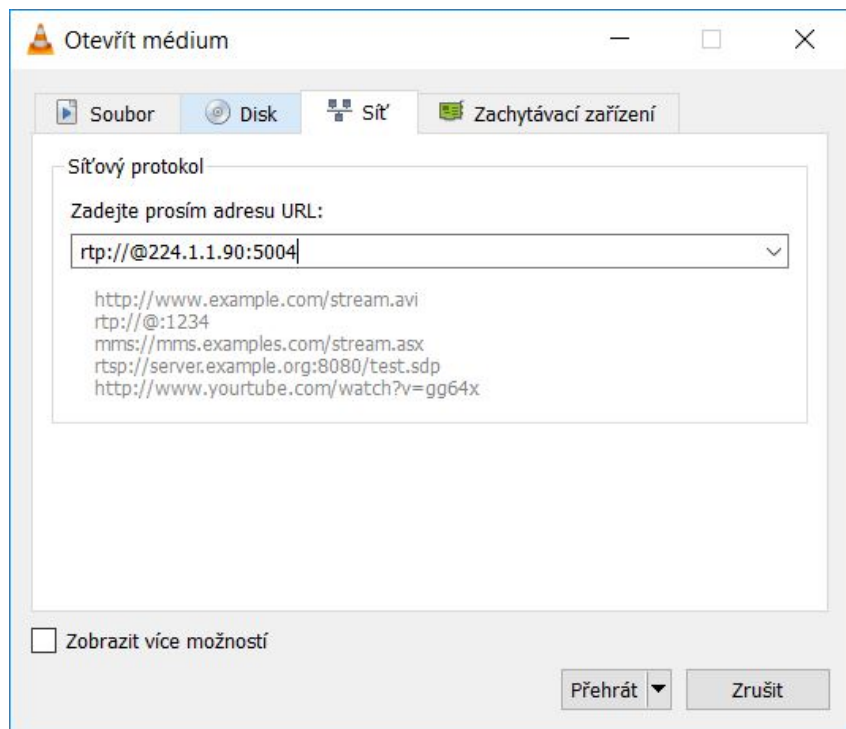


(a) Krok 5



(b) Krok 6

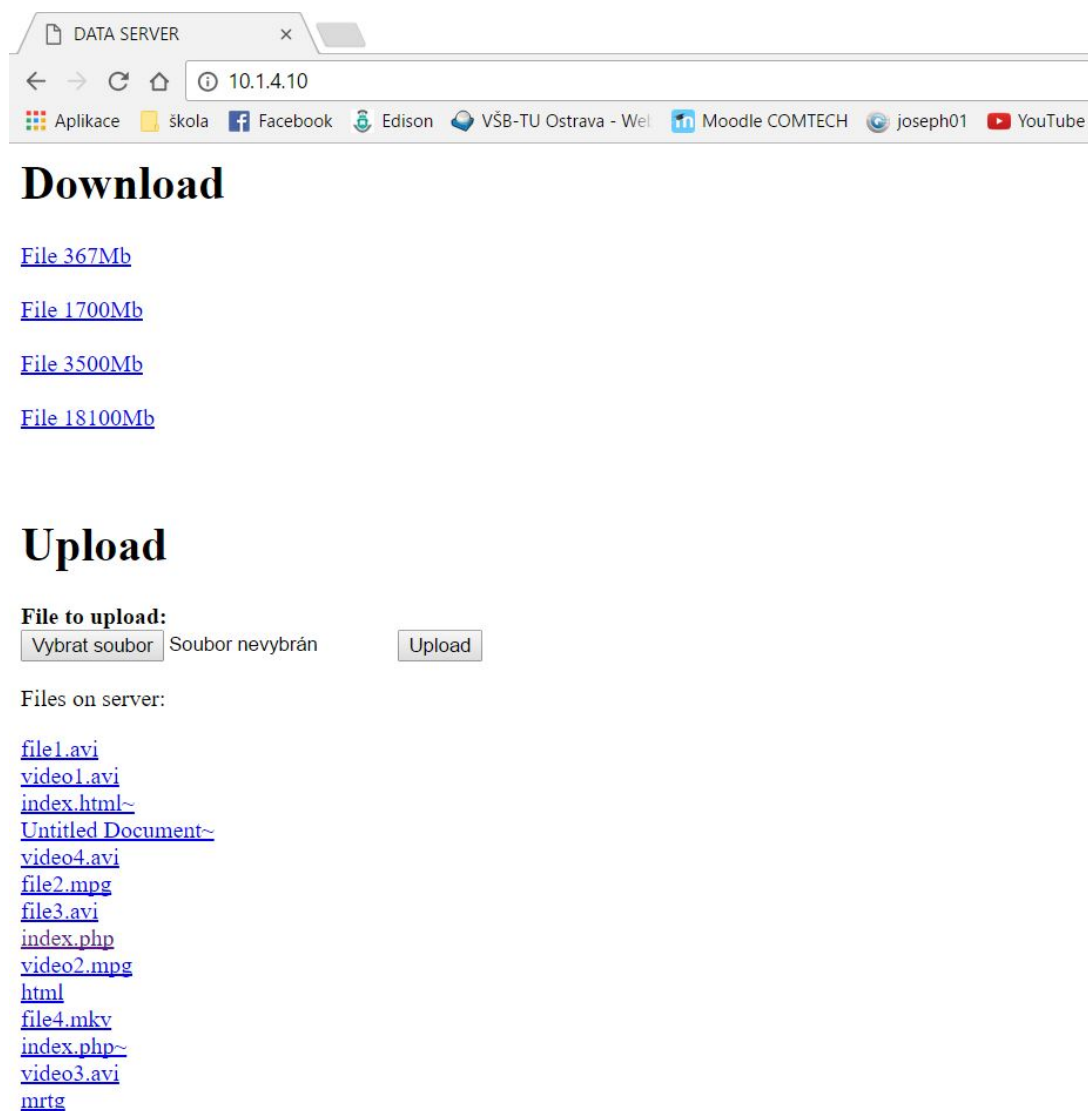
Obrázek 104: Nastavení vysílání videa krok 5 a 6



Obrázek 105: Krok pro přijímání videa na straně uživatele

Datový server

Na obrázku níže je zobrazena webová stránka datového serveru, na kterém jsme mohli stahovat a nahrávat soubory.



Obrázek 106: Webová stránka datového serveru

E Ukázky práce s používanými programy

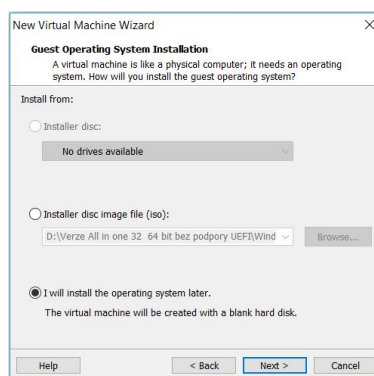
V této sekci přílohy jsou zobrazeny obrázky používaných programů.

IxChariot 7.20 EA

Software IxChariot je nainstalovaný na virtuálním stroji s operačním systémem Windows 7. Pro spuštění virtuálního stroje bylo využito softwaru VMware Workstation. Nejprve je potřeba vytvořit nový virtuální stroj. Na obrázcích níže jsou jednotlivé kroky pro spuštění (puntíky značí výběr dané možnosti).

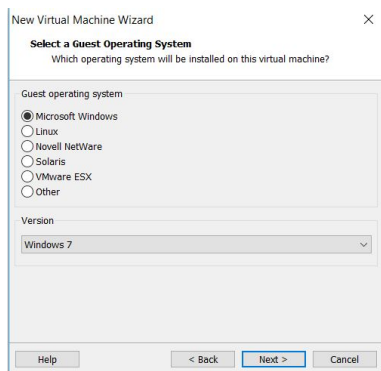


(a) Krok 1

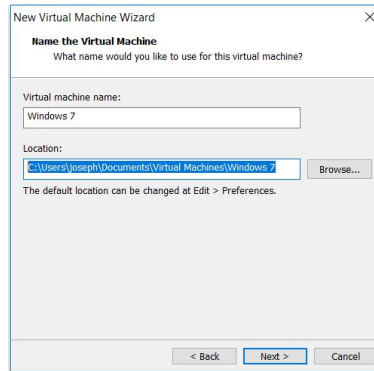


(b) Krok 2

Obrázek 107: Spuštění virtuálního stroje - krok 1 a 2

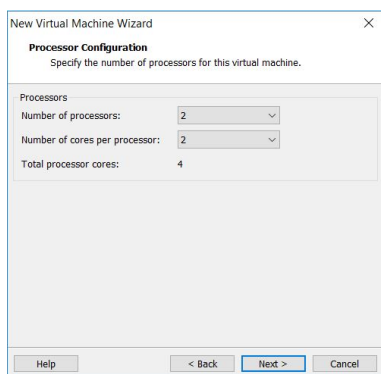


(a) Krok 3

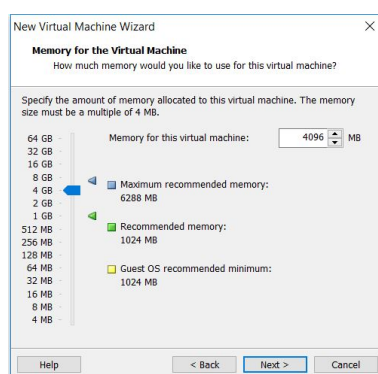


(b) Krok 4

Obrázek 108: Spuštění virtuálního stroje - krok 3 a 4

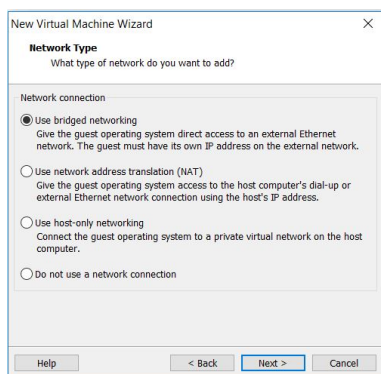


(a) Krok 5

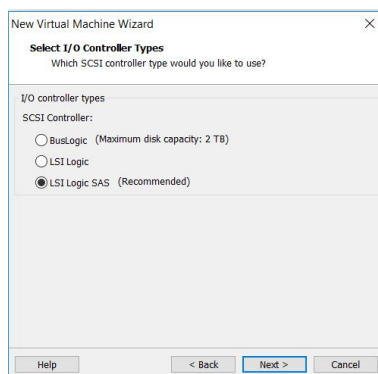


(b) Krok 6

Obrázek 109: Spuštění virtuálního stroje - krok 5 a 6

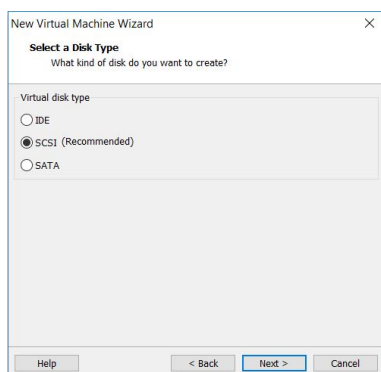


(a) Krok 7

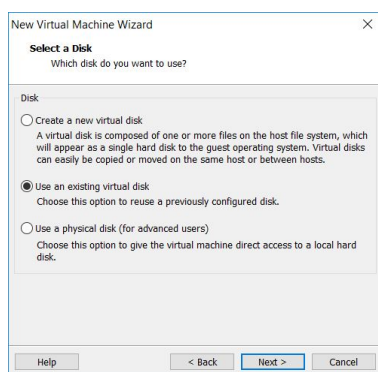


(b) Krok 8

Obrázek 110: Spuštění virtuálního stroje - krok 7 a 8

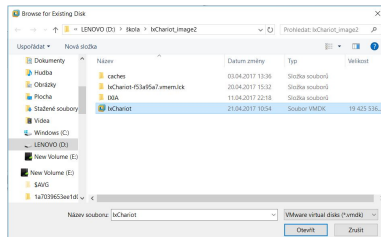


(a) Krok 9

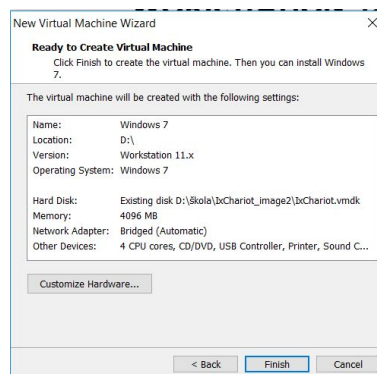


(b) Krok 10

Obrázek 111: Spuštění virtuálního stroje - krok 9 a 10



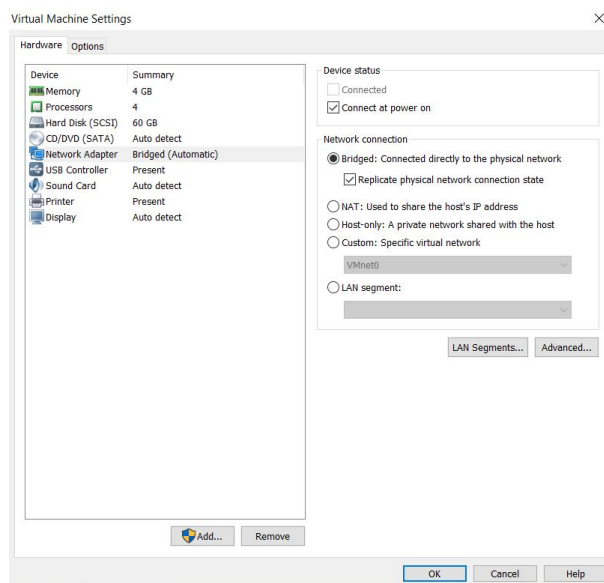
(a) Krok 11



(b) Krok 12

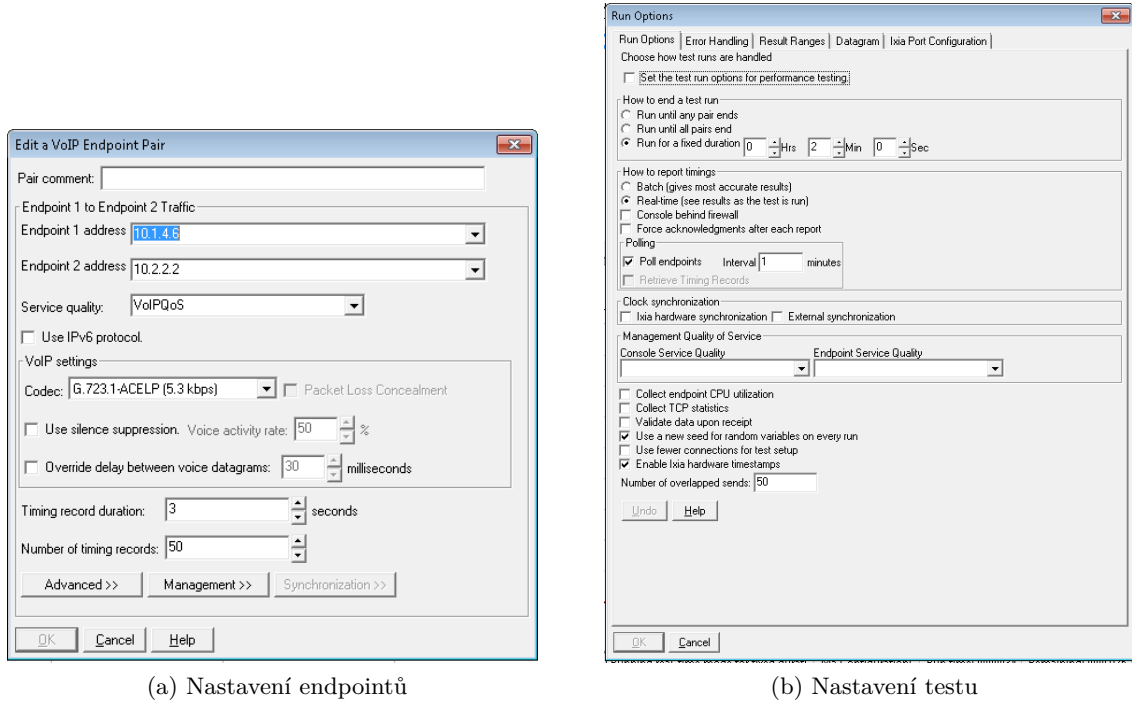
Obrázek 112: Spuštění virtuálního stroje - krok 11 a 12

Aby mohl software komunikovat s ostatními komponenty v síti, je potřeba změnit nastavení v síti. A to na Bridged a zaškrtnout *Replicate physical network connection state*.

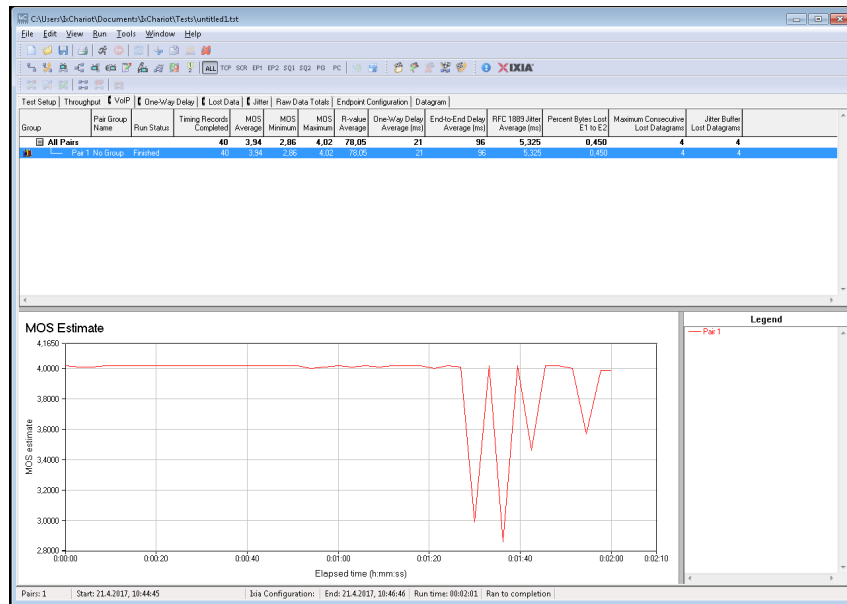


Obrázek 113: Spuštění virtuálního stroje - krok 13

Na dalších obrazcích je zobrazeno nastavení a vyhodnocení testu. Při využívání testování je potřeba mít na daném počítači nainstalovanou funkci performance endpoint, která je volně dostupná (většinou by měla být součástí operačního systému).

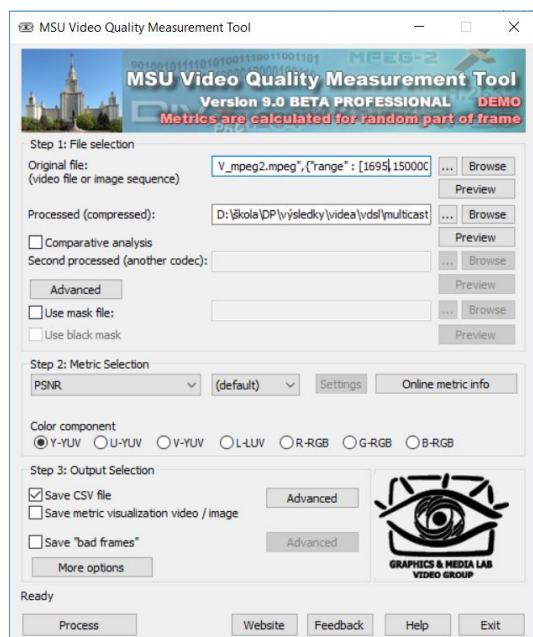


Obrázek 114: IxChariot - nastavení konfigurace testu

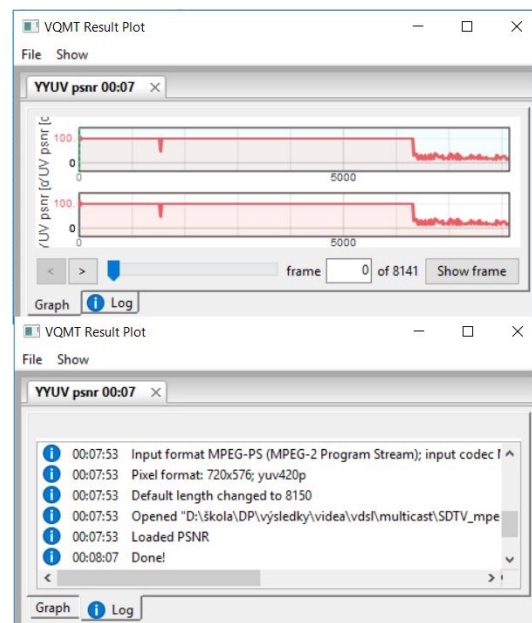


Obrázek 115: IxChariot - vyhodnocení

MSU - Video Quality Measurement Tool



(a) Nastavení testu



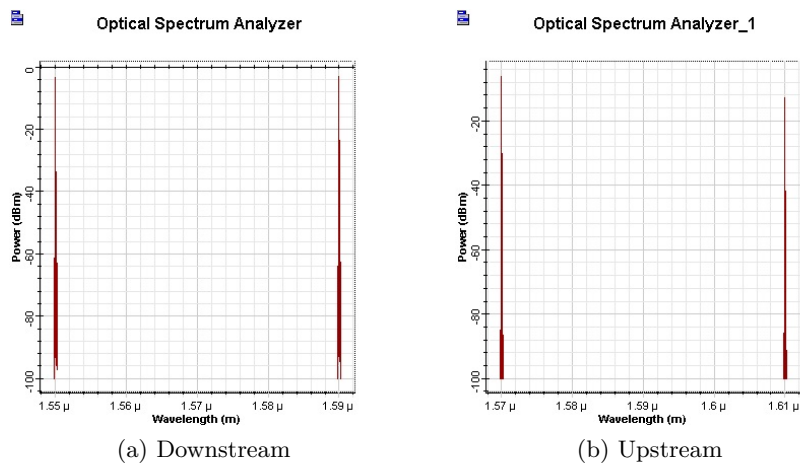
(b) Průběh testu

Obrázek 116: Nastavení a průběh testu

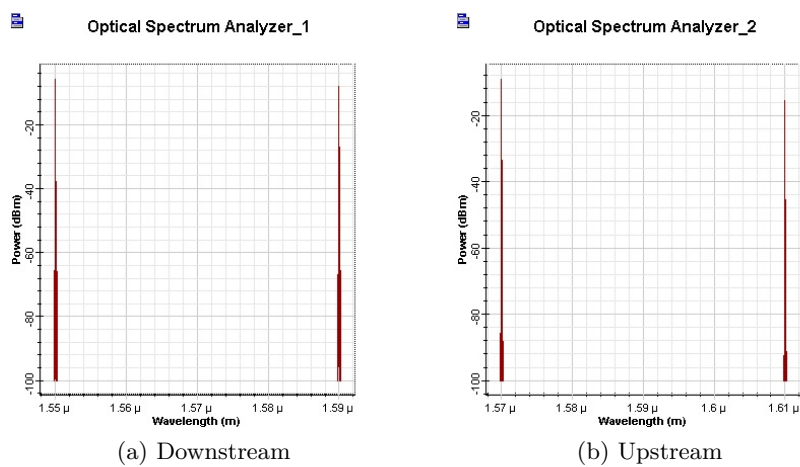
F Výsledky simulace

Spektrální analýza

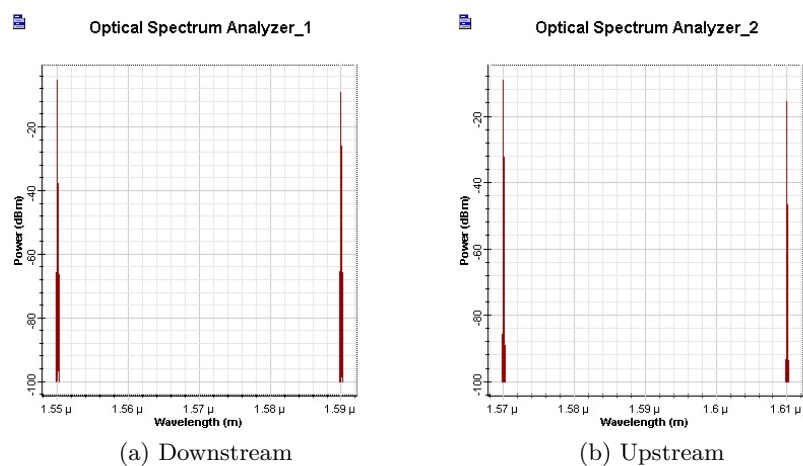
Na obrázcích níže jsou zobrazeny optické spektra pro sestupný i vzestupný směr při délkách optických tras 0 až 35 km, s krokem 5 km.



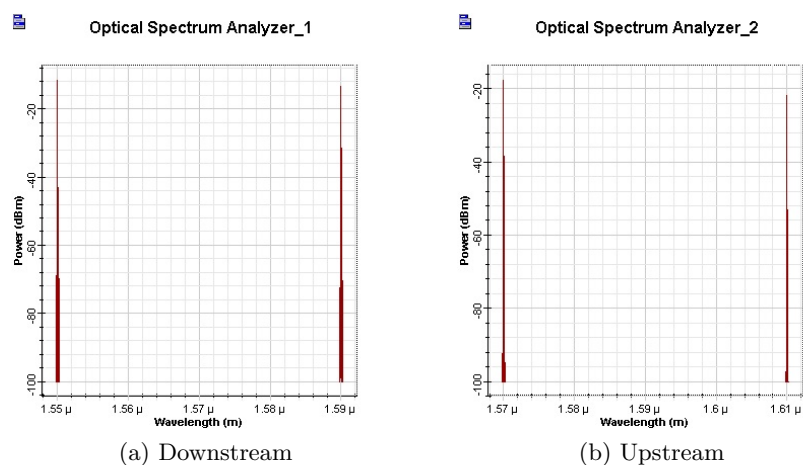
Obrázek 117: Optické spektrum při trase 0 km



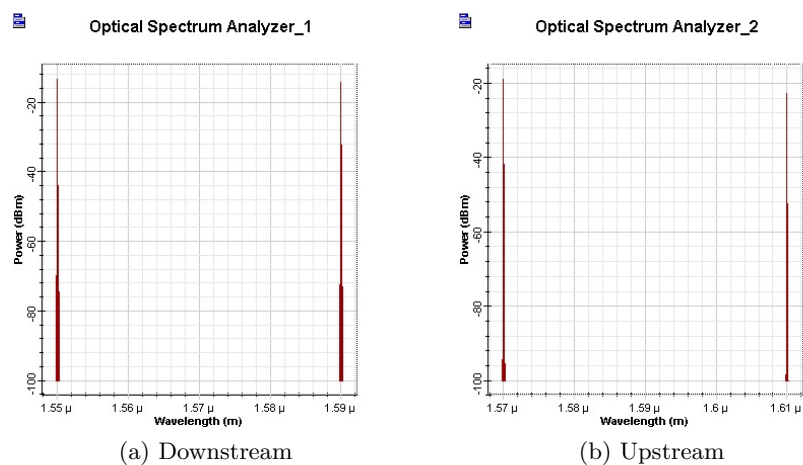
Obrázek 118: Optické spektrum při trase 5 km



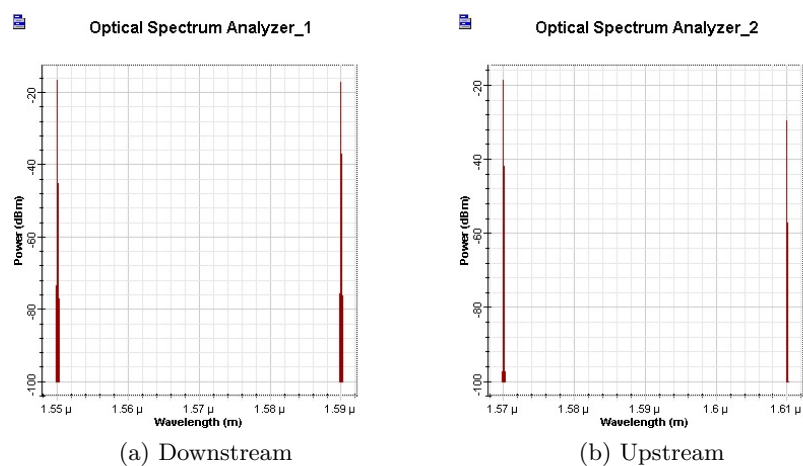
Obrázek 119: Optické spektrum při trase 10 km



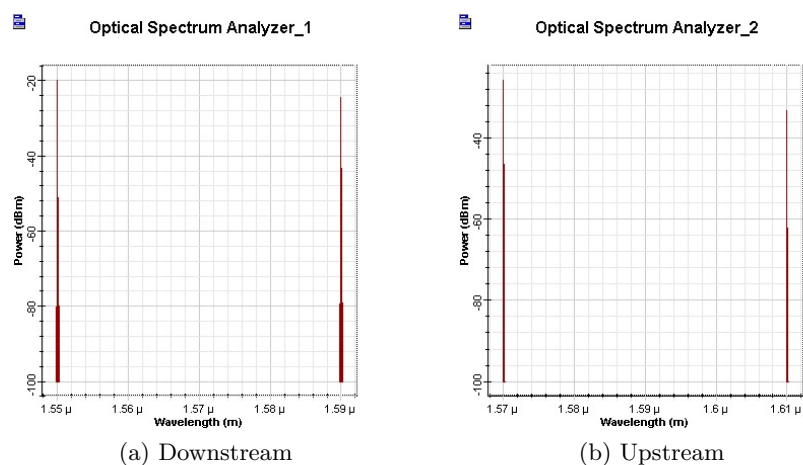
Obrázek 120: Optické spektrum při trase 15 km



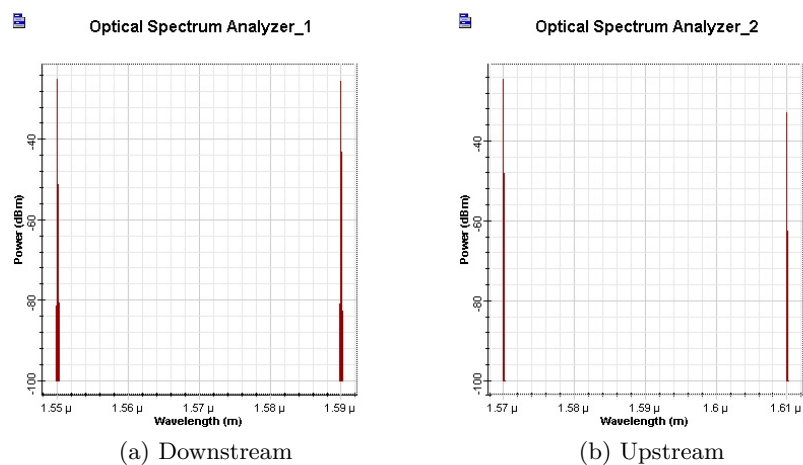
Obrázek 121: Optické spektrum při trase 20 km



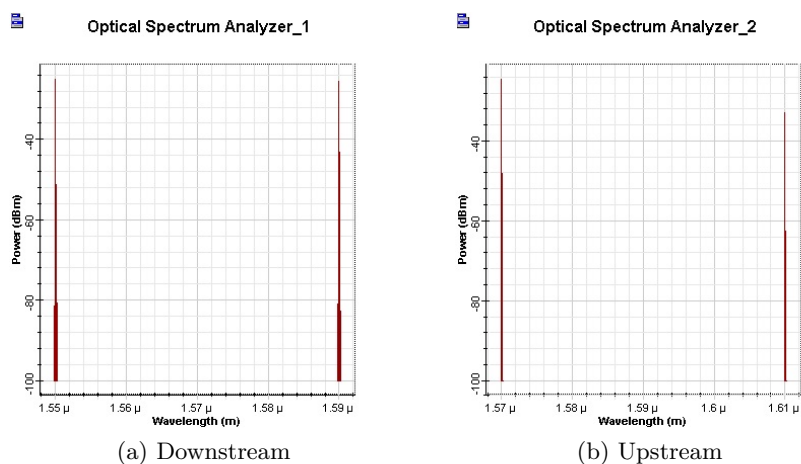
Obrázek 122: Optické spektrum při trase 25 km



Obrázek 123: Optické spektrum při trase 30 km



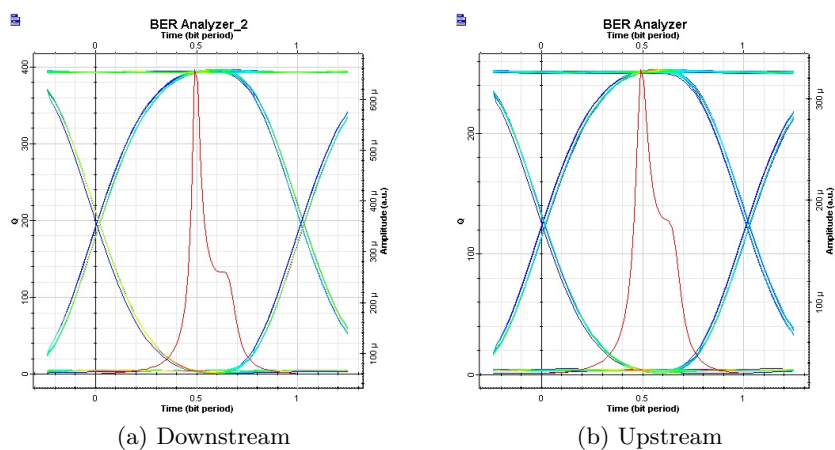
Obrázek 124: Optické spektrum při trase 35 km



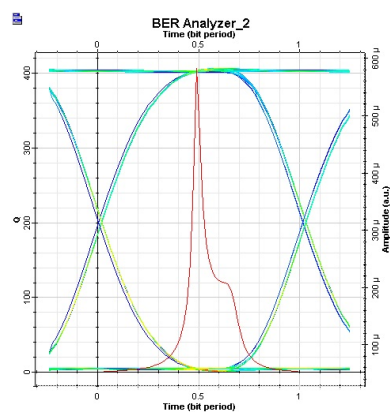
Obrázek 125: Optické spektrum při trase 35 km

Diagram oka

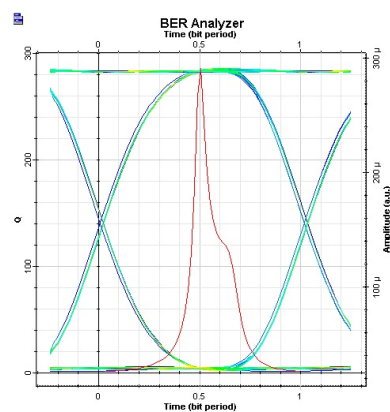
Na obrázcích níže jsou zobrazeny diagramy oka pro sestupný i vzestupný směr při délkách optických tras 0 až 35 km, s krokem 5 km.



Obrázek 126: Diagram oka pro první kanál při trase 5 km

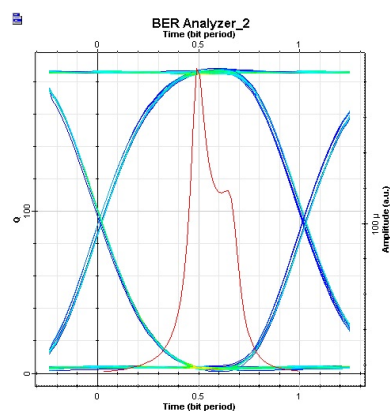


(a) Downstream

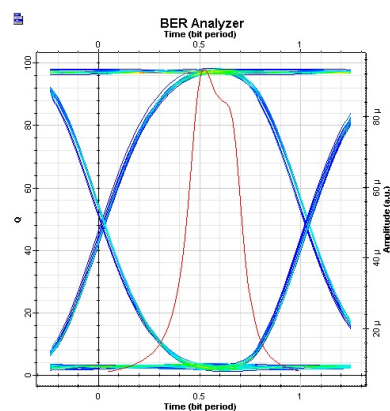


(b) Upstream

Obrázek 127: Diagram oka pro první kanál při trase 10 km

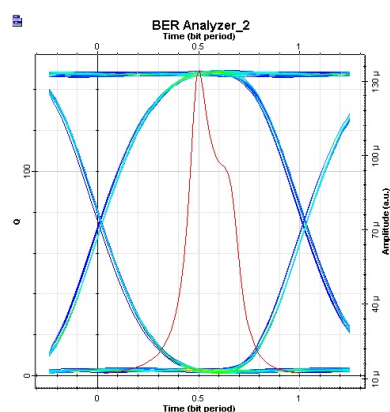


(a) Downstream

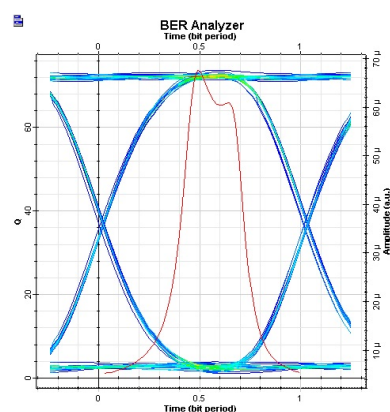


(b) Upstream

Obrázek 128: Diagram oka pro první kanál při trase 15 km

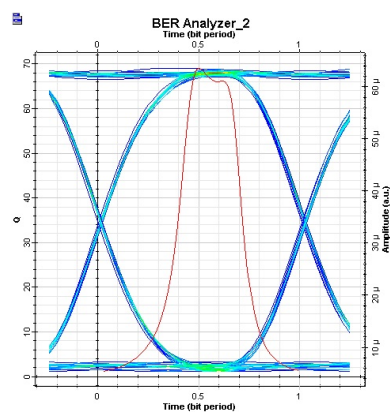


(a) Downstream

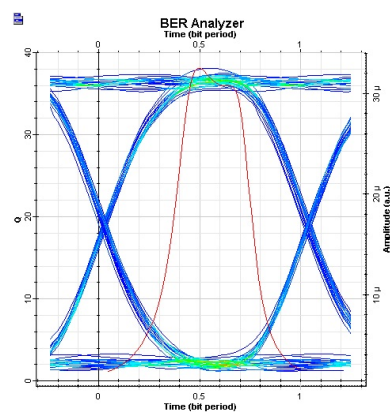


(b) Upstream

Obrázek 129: Diagram oka pro první kanál při trase 20 km

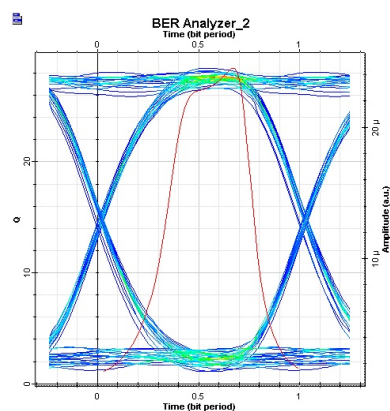


(a) Downstream

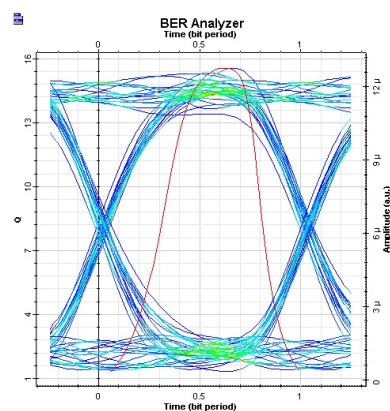


(b) Upstream

Obrázek 130: Diagram oka pro první kanál při trase 25 km

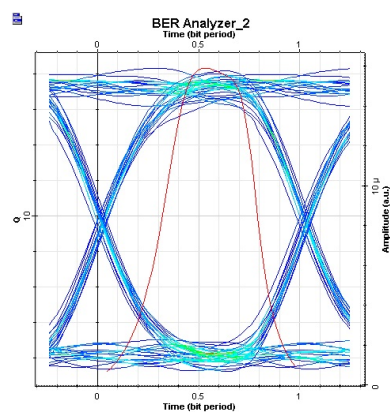


(a) Downstream

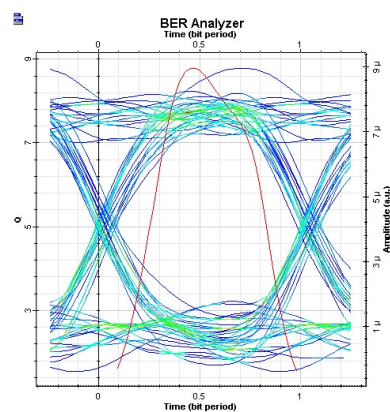


(b) Upstream

Obrázek 131: Diagram oka pro první kanál při trase 30 km

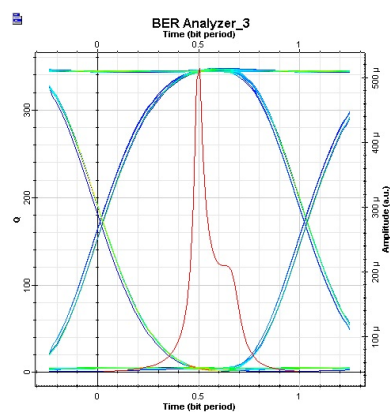


(a) Downstream

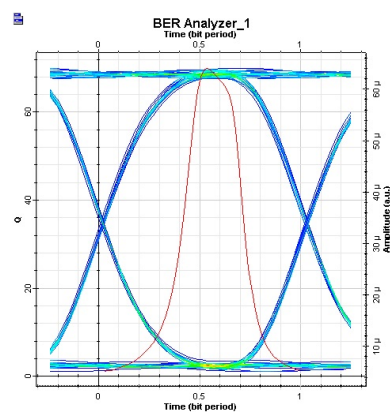


(b) Upstream

Obrázek 132: Diagram oka pro první kanál při trase 35 km

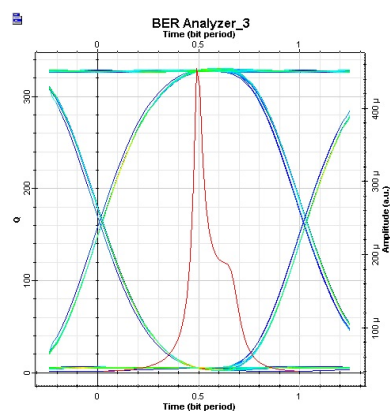


(a) Downstream

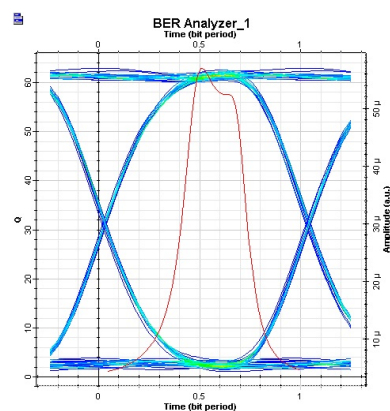


(b) Upstream

Obrázek 133: Diagram oka pro první kanál při trase 5 km

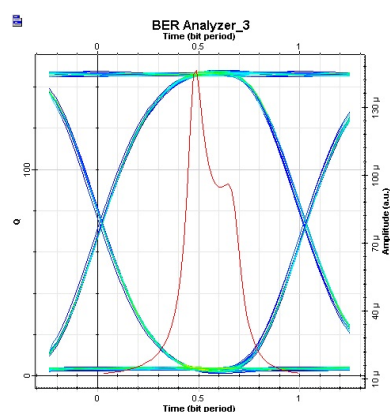


(a) Downstream

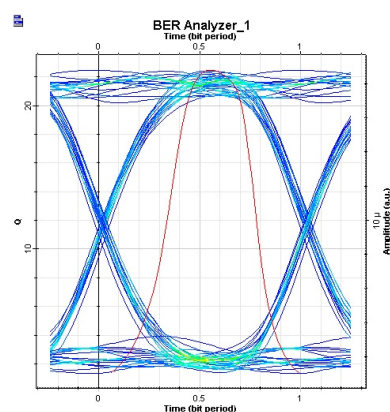


(b) Upstream

Obrázek 134: Diagram oka pro první kanál při trase 10 km

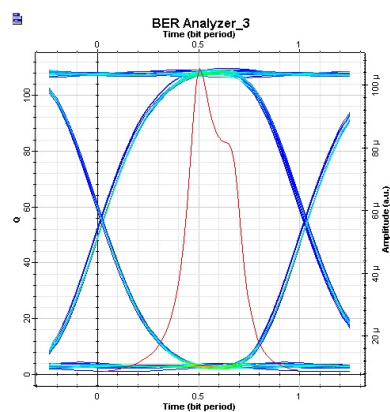


(a) Downstream

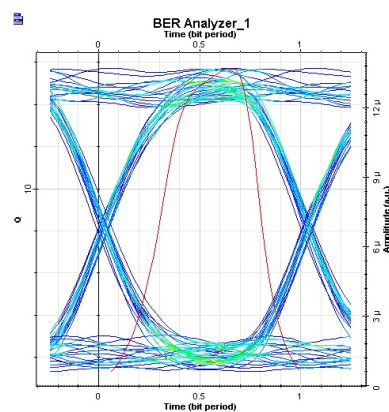


(b) Upstream

Obrázek 135: Diagram oka pro první kanál při trase 15 km

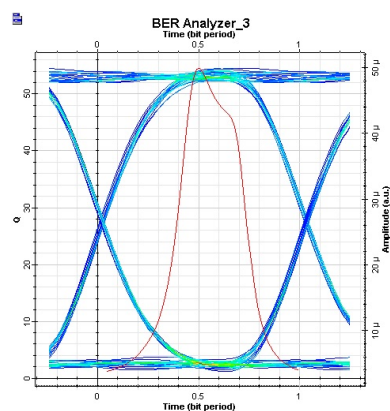


(a) Downstream

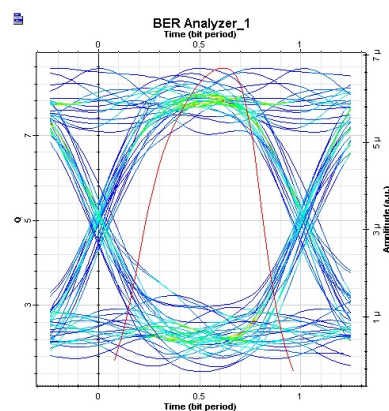


(b) Upstream

Obrázek 136: Diagram oka pro druhý kanál při trase 20 km

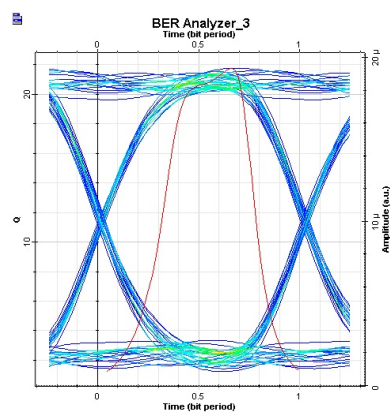


(a) Downstream

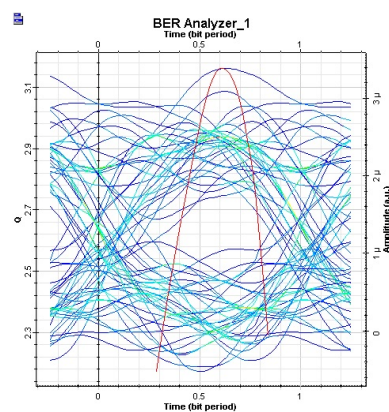


(b) Upstream

Obrázek 137: Diagram oka pro druhý kanál při trase 25 km

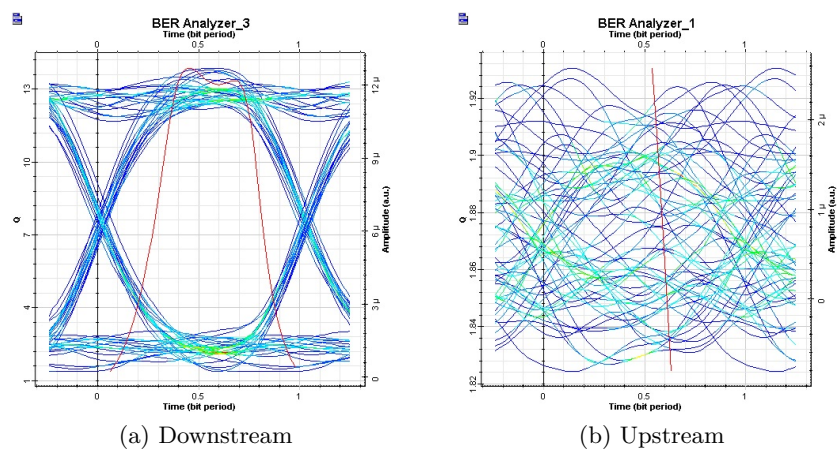


(a) Downstream



(b) Upstream

Obrázek 138: Diagram oka pro druhý kanál při trase 30 km



Obrázek 139: Diagram oka pro druhý kanál při trase 35 km